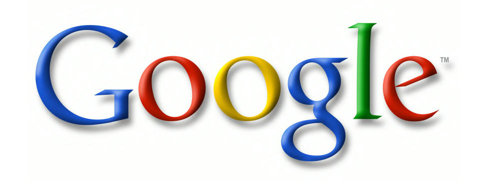
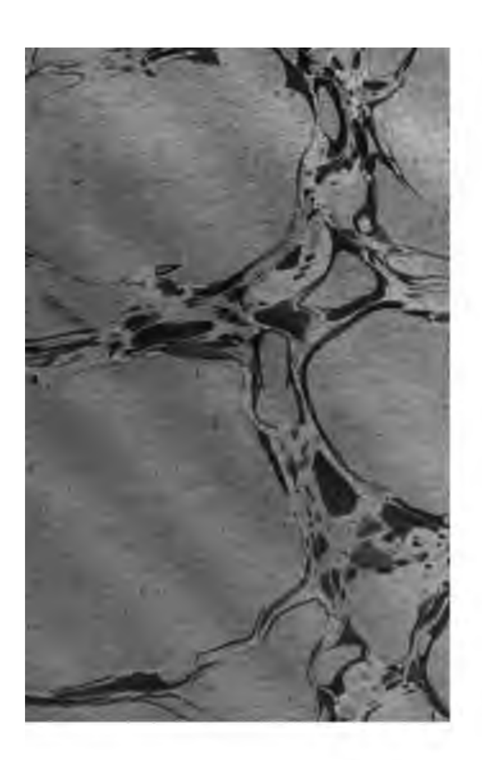
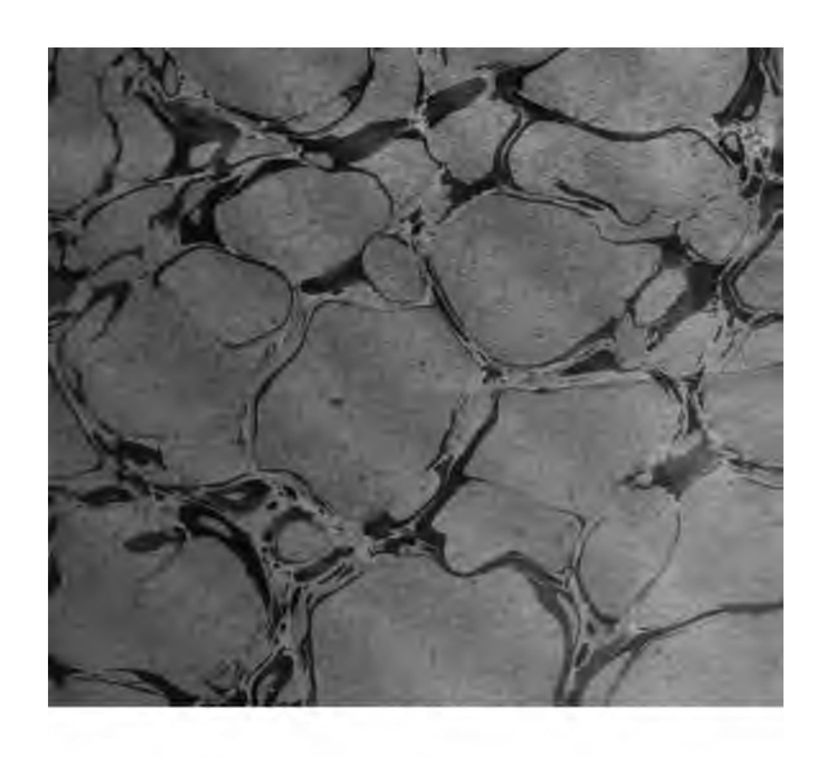
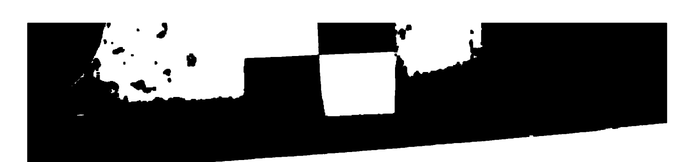








[redacted]

COURS ÉLÉMENTAIRE

DE MÉCANIQUE.

Paris. — Imprimerie de L. Martinet, rue Mignon, 2.

[redacted]

Bibliothèque Polytechnique.

COURS ÉLÉMENTAIRE

DE

MÉCANIQUE

THÉORIQUE ET APPLIQUÉE,

PAR

M. CH. DELAUNAY,

INGÉNIEUR DES MINES,
PROFESSEUR DE MÉCANIQUE A L'ÉCOLE POLYTECHNIQUE ET A LA FACULTÉ DES SCIENCES DE PARIS.

TROISIÈME ÉDITION.

PARIS,

VICTOR MASSON, Place de l'École-de-Médecine, 17.

LANGLOIS & LECLERCQ, Rue des Mathurins-Saint-Jacques, 10.

MDCCCLIV.



PROGRAMME

DU COURS DE MÉCANIQUE DES LYCÉES

Classe de rhétorique. — Section des sciences.

LES ÉDITEURS ONT INDIQUÉ, PAR DES NUMÉROS DE RENVOI, LES PAGES OÙ SONT TRAITÉES LES MATIÈRES DE CE PROGRAMME.

Du temps et de sa mesure. Unités adoptées (6). — Du pendule. Résultats des observations de Galilée (115).

Du mouvement. — Il est absolu ou relatif (5).

Du mouvement uniforme. Vitesse (7).

Du mouvement varié en général. — Mouvement accéléré, retardé, périodique. — Vitesse (8).

Mouvement uniformément accéléré. — Lois de ce mouvement.

La chute des graves dans le vide offre un exemple du mouvement uniformément accéléré (97) — Machine d'Atwood (95). — Appareil à indications continues (104).

Mouvement uniformément retardé (102).

Mouvement circulaire ou de rotation. — Vitesse angulaire (8).

Composition des mouvements. — Indépendance des mouvements simultanés, constatée par l'observation.

Composition des chemins parcourus et des vitesses (122).

Transformation de mouvement.

Du plan incliné (68). — Rapport des espaces parcourus dans le sens du plan, aux espaces parcourus dans le sens de sa base et de sa hauteur (80).

Des poulies. — Poulie fixe. — Poulie mobile dans le cas où les deux brins de la corde sont parallèles (47). — Poulies mouflées (48) — Rapports des chemins parcourus par la main de l'homme et par le *fardeau (79)*.

Du treuil. — Treuil des carriers. — Treuil des puits (49, 52) — Rapports des chemins parcourus par les chevilles ou par la manivelle, au chemin parcouru par le fardeau.

Des engrenages. — Description sommaire. — Tracé pratique. — Rapport des nombres de tours des roues et des pignons (56).

Des courroies et cordes sans fin (54).

De la vis et de son écrou. — Rapport des chemins parcourus par l'extrémité du levier et par l'écrou ou la vis, dans le sens de l'axe (83).

Des forces et de leurs effets. — Loi de l'inertie. — Forces. — Effets des forces. — Conditions de l'égalité de deux forces. — Égalité de l'action et de la réaction (10).

Comparaison des forces aux poids, à l'aide de dynamomètres. — Le kilogramme peut être pris pour unité de force (13).

Principe de la proportionnalité des forces aux vitesses. — Deux forces constantes appliquées successivement à un même point matériel, partant du repos ou animé d'une vitesse initiale de même direction que les forces, sont entre elles comme les accélérations qu'elles produisent (109).

Conséquence relative au cas où l'une des forces est le poids même du mobile. — Définition de la masse (111).

Relation entre les forces constantes, les masses et les accélérations (110).

Travail d'une force constante, agissant sur un point matériel qui se meut en ligne droite dans la direction de la force (86).

Cas d'une force constante, appliquée tangentiellement à la circonférence d'une roue.

Unités de travail. — Kilogrammètre (89). — Force de cheval-vapeur (299).

Composition de deux forces appliquées à un même point matériel, déduite de la composition des vitesses.

Les distances d'un point de la résultante à deux composantes sont en raison inverse des intensités de ces composantes. — Conséquence pour la composition des forces parallèles.

Extension des propositions qui précèdent aux cas de plusieurs forces concourantes ou parallèles (16 à 27).

Conditions de l'équilibre d'un point matériel. Ces conditions sont indépendantes de l'état de mouvement ou de repos du point considéré.

Centre des forces parallèles. — Centre de gravité. — Cas où le corps a un plan, un axe de symétrie, un centre de figure. — Sphère. — Parallélipipède. — Méthode pratique pour déterminer le centre de gravité des corps solides (28 à 33).

Du mouvement uniforme des machines. — Énoncé du principe de la transmission du travail dans ce cas (90).

Le travail moteur est toujours plus grand que l'effet utile (178). — Impossibilité du mouvement perpétuel et de la multiplication du travail moteur (306).

Rendement d'une machine. — C'est le rapport du travail ou effet utile transmis au travail moteur dépensé. — Il constitue la valeur industrielle de l'appareil. — Il est toujours inférieur à l'unité (179).

Énoncé des lois expérimentales du frottement : 1° à l'instant du départ ; 2° pendant le mouvement (158).

Application des principes et des notions précédentes au plan incliné, au levier, au treuil, à la poulie simple ou mouflée, à la vis. — Usages de ces machines (77).

Écoulement des liquides. — Expérience et règle de Torricelli. — Contraction des veines (414). — Formules pratiques pour les cas les plus usuels du jaugeage des cours d'eau (456).

Notions sur les moteurs ou récepteurs hydrauliques. Force ou travail absolu d'un cours d'eau. — Il y a pour tous les récepteurs une vitesse relative au maximum d'effet (537).

Anciennes roues à palettes planes, recevant l'eau en dessous. — Roues à aubes courbes. — Roues à aubes planes emboîtées dans des coursiers circulaires. — Roues à augets recevant l'eau à la partie supérieure. — Rendement de ces diverses roues (541).

Des pompes. — Soupapes. — Pistons. — Pompes élévatoires. — Pompes aspirantes et élévatoires. — Pompes aspirantes et foulantes. — Causes de pertes de travail moteur inhérentes aux pompes (499).

[redacted]

PROGRAMME

DU COURS DE MÉCANIQUE DES LYCÉES

Classe de rhétorique. — Section des sciences.

LES ÉDITEURS ONT INDIQUÉ, PAR DES NUMÉROS DE RENVOI, LES PAGES OU SONT TRAITÉES LES MATIÈRES DE CE PROGRAMME.

Du temps et de sa mesure. Unités adoptées (6). — Du pendule. Résultats des observations de Galilée (115).

Du mouvement. — Il est absolu ou relatif (5).

Du mouvement uniforme. Vitesse (7).

Du mouvement varié en général. — Mouvement accéléré, retardé, périodique. — Vitesse (8).

Mouvement uniformément accéléré. — Lois de ce mouvement.

La chute des graves dans le vide offre un exemple du mouvement uniformément accéléré (97) — Machine d'Atwood (95). — Appareil à indications continues (104).

Mouvement uniformément retardé (102).

Mouvement circulaire ou de rotation. — Vitesse angulaire (8).

Composition des mouvements. — Indépendance des mouvements simultanés, constatée par l'observation.

Composition des chemins parcourus et des vitesses (122).

Transformation de mouvement.

Du plan incliné (68). — Rapport des espaces parcourus dans le sens du plan, aux espaces parcourus dans le sens de sa base et de sa hauteur (80).

Des poulies. — Poulie fixe. — Poulie mobile dans le cas où les deux brins de la corde sont parallèles (47). — Poulies mouflées (48). — Rapports des chemins parcourus par la main de l'homme et par le fardeau (79).

§ 3. **Porosité.** — Les molécules d'un corps ne se touchent pas : elles sont à une certaine distance les unes des autres, et l'on nomme *pores* les intervalles, vides de matière, qui existent entre elles. Les corps les plus compactes en apparence ne sont pas dépourvus de pores. Les académiciens de Florence, en 1661, ayant rempli d'eau une sphère d'or creuse, et ayant fortement comprimé cette eau, la virent suinter sur toute la surface du métal : l'eau avait traversé les pores de l'or. La porosité ne peut pas être mise en évidence de cette manière pour tous les corps : ainsi le verre est imperméable aux liquides. Mais les changements de volume, qui accompagnent toujours les changements de température, ne peuvent s'expliquer qu'en admettant que les molécules s'éloignent ou se rapprochent les unes des autres, suivant que la température augmente ou diminue; il en résulte nécessairement que, dans aucun corps de la nature, les molécules ne sont en contact.

§ 4. **États des corps.** — Tous les corps sont susceptibles de prendre trois états différents : l'état solide, l'état liquide et l'état gazeux. Un des corps les plus répandus dans la nature, l'eau, se montre à nous habituellement à l'état liquide : elle passe à l'état solide, lorsqu'elle se change en glace; elle passe à l'état gazeux, lorsqu'elle se transforme en vapeur. Un grand nombre d'autres corps ont été obtenus sous ces trois états, et l'analogie a conduit à admettre qu'il en serait de même de tous les corps, si l'on pouvait les soumettre à des moyens suffisamment énergiques. A chaque instant de nouveaux faits viennent confirmer ces idées adoptées par les physiciens; et, si quelques doutes pouvaient encore subsister, ils seraient complétement levés par les belles expériences de M. Despretz, dans lesquelles il est parvenu à fondre et à volatiliser le charbon, le corps le plus réfractaire que l'on connaisse.

§ 5. **Corps solides.** — Dans les corps solides, les molécules ont des positions déterminées les unes par rapport aux autres; si l'on cherche à les déranger, à déformer le corps, on éprouve une certaine résistance. Cependant l'effort qu'on exerce déplace réellement les molécules, et produit un changement de forme qui est plus ou moins sensible suivant les cas. Un faible effort, appliqué à un barreau mince d'acier, ou à une lame de verre, les fléchira un peu. Si cet effort cesse, le barreau d'acier et la lame de verre reprendront la forme qu'ils avaient précédemment. Cette propriété qu'ont les corps solides de revenir à leur forme primitive, lorsqu'ils sont soustraits à l'action de l'effort qui les avait déformés, constitue ce qu'on appelle l'*élasticité*. Si l'effort appliqué au corps est trop grand, ce corps pourra se briser, ou bien il se déformera tellement, qu'il ne

[redacted]

pourra plus reprendre exactement sa forme primitive lorsque l'effort cessera : on dit alors qu'on a dépassé la *limite de l'élasticité*. Tous les corps solides sont élastiques, mais à des degrés très différents. Il en est qui le sont tellement peu, qu'il est difficile de leur appliquer un effort assez faible pour ne pas dépasser la limite dont on vient de parler, et qu'on peut les regarder comme étant complétement dépourvus d'élasticité : tel est, par exemple, le plomb. D'autres, au contraire, sont très élastiques, tels que l'acier, le caoutchouc.

§ 6. **Liquides, ou fluides incompressibles.** — Dans les liquides et les gaz, les molécules sont extrêmement mobiles les unes par rapport aux autres; le moindre effort les déplace. Cette propriété fait qu'on les confond ensemble sous le nom de *fluides*.

Si l'on comprime un liquide dans un vase fermé, on éprouve une très grande résistance, et l'on a peine à reconnaître une légère diminution dans le volume du liquide. Cette diminution est tellement faible, qu'on a douté pendant longtemps qu'elle existât réellement : aussi a-t-on désigné les liquides sous le nom de *fluides incompressibles*. Nous conserverons cette idée de l'incompressibilité des liquides, quoiqu'elle ait été démontrée inexacte, parce qu'il ne peut pas en résulter d'erreur appréciable dans les applications.

§ 7. **Gaz, ou fluides élastiques.** — Si l'on éprouve une très grande difficulté à diminuer le volume d'un liquide d'une quantité insignifiante, par la compression, il n'en est pas de même d'un gaz. Un faible effort suffit pour comprimer, d'une manière très sensible, un gaz contenu dans une enveloppe fermée. Une vessie pleine d'air, et dont l'ouverture a été hermétiquement fermée, diminue visiblement de volume lorsqu'on la serre entre les deux mains. Si, dans un tube de verre, *fig.* 1, fermé par un bout, on introduit un piston capable de remplir complétement l'ouverture du tube, l'air contenu à l'intérieur ne trouvera pas d'issue pour s'échapper,



Fig. 1.

lorsqu'on enfoncera le piston dans le tube : en exerçant une pression sur la tige du piston, on verra le volume de cet air diminuer de plus en plus, et l'on pourra ainsi le réduire à une faible fraction de ce qu'il était primitivement. Lorsqu'ensuite on abandonnera le piston, l'air le repoussera jusque vers l'extrémité du tube en reprenant son premier volume. L'air est donc éminemment compressible et élastique. Il en est de même de tous les gaz, qui, pour cette raison, ont reçu le nom de *fluides élastiques*.

Lorsque l'air est fortement comprimé, comme dans l'expérience

qu'on vient d'indiquer, sa température s'élève beaucoup, et si l'o
a mis un peu d'amadou sur la face intérieure du piston, il est ass
échauffé pour prendre feu. C'est pour cela que l'appareil représen
par la *fig.* 1 se nomme *briquet pneumatique*, ou *briquet à air*.

Un litre d'eau étant réduit en vapeur, par l'ébullition dans un va
ouvert, produit 1696 litres de vapeur, c'est-à-dire que cette vape
serait capable de remplir un cube dont le côté serait de près
12 décimètres (un cube de 12 décimètres de côté contient 1728 litre
Si la masse d'eau avait primitivement la forme d'un cube, son cô
aurait été d'un décimètre : on peut concevoir que, dans le passa
de l'état liquide à l'état gazeux, les molécules de l'eau se soie
simplement éloignées les unes des autres, en conservant leurs di
positions relatives; et puisque le côté du cube doit devenir ain
de près de 12 décimètres, il en résulte que, dans la vapeur d'ea
les molécules sont près de douze fois plus éloignées les unes d
autres que dans l'eau. On voit donc que les dimensions de chaq
molécule doivent être très petites relativement aux distances q
les séparent. Il en est de même pour tous les corps gazeux.

[redacted]

PREMIÈRE PARTIE.

PRINCIPES GÉNÉRAUX
DE LA MÉCANIQUE.

NOTIONS GÉNÉRALES SUR LE MOUVEMENT.

§ 8. Lorsqu'un corps occupe successivement différentes positions dans l'espace, on dit qu'il est en *mouvement*. Une bille qui roule sur le sol, un cheval qui marche sur une route, un bateau qui descend le courant d'une rivière, sont des corps en mouvement.

Nous ne pouvons reconnaître le changement de position de la bille, du cheval, du bateau, qu'en les comparant à des objets voisins qui nous servent de points de repère : ce seront, par exemple, les aspérités du sol, les sinuosités de la route et de la rivière, ou les arbres plantés sur leurs bords. Notre propre corps nous sert souvent de point de repère, pour reconnaître le mouvement des corps qui sont dans notre voisinage.

Lorsque nous n'avons aucun terme de comparaison pour juger du mouvement d'un corps, nous le croyons immobile. C'est ainsi que, si nous sommes dans le salon d'un bateau à vapeur qui marche sur une rivière, et que des stores abaissés sur les fenêtres nous ôtent la vue des objets extérieurs, tout ce qui nous entoure nous semble immobile : cette idée d'immobilité se fixe tellement dans notre esprit, que si nous remontons sur le pont, la première impression que nous éprouvons, c'est de croire que les bords de la rivière, les arbres, les maisons, sont en mouvement; et ce n'est qu'en faisant un effort sur nous-mêmes que nous pouvons revenir à l'idée de l'immobilité des arbres et des maisons, et du mouvement du bateau avec tout ce qu'il porte.

Si les points de repère à l'aide desquels nous jugeons qu'un corps se déplace sont eux-mêmes en mouvement, le mouvement de ce corps ne sera que relatif. Tel sera, par exemple, le mouvement d'une bille que nous verrons rouler sur le pont d'un bateau en marche. Si nous comparions cette bille aux points fixes qui existent sur les bords de la rivière, nous lui trouverions un mouvement tout différent. Il pourrait même se faire qu'elle fût en repos, si elle avait été lancée de l'avant à l'arrière du bateau, avec une telle vitesse qu'elle restât *toujours en face des mêmes* points des rives : elle serait *alors comme si le bateau glissait sous elle* sans l'entraîner.

Tous les mouvements que nous observons autour de nous ne sont que des mouvements relatifs. En effet, la terre est en mouvement autour du soleil, et décrit, en un an, à peu près une circonférence de cercle dont le rayon est de 150 millions de kilomètres. Elle est encore animée d'autres mouvements ; mais celui-là nous suffit pour dire qu'aucun des points de repère que nous prenons sur sa surface n'est immobile. Cependant, dans l'étude des machines et des divers phénomènes mécaniques qui se passent sur la terre, nous pourrons presque toujours considérer les mouvements dont nous parlerons comme des mouvements absolus. Dans la plupart des cas, les choses se passent de la même manière que si la terre était absolument fixe.

§ 9. Lorsqu'on parle du mouvement d'un corps, on fait souvent abstraction de ses dimensions, pour ne s'occuper que d'un de ses points, dans lequel on imagine que toute sa matière est condensée. De cette manière, en se représentant par la pensée la suite des positions que le corps a occupées, on a l'idée d'une ligne, droite ou courbe, qui a été décrite par ce corps, et qu'on nomme sa *trajectoire*. C'est ainsi que, quand on dit qu'un boulet lancé obliquement décrit une ligne courbe, on ne pense qu'au centre de ce boulet. Il n'y a qu'un instant, nous avons dit que la terre décrit à peu près une circonférence de cercle autour du soleil : nous avons fait abstraction des dimensions de la terre, et nous avons regardé toute sa matière comme concentrée en son centre.

Le mouvement d'un corps est *rectiligne* ou *curviligne*, suivant que la ligne qu'il décrit, ou sa trajectoire, est une ligne droite ou une ligne courbe. Les mouvements curvilignes se distinguent les uns des autres par la nature de la ligne courbe qui est décrite : le mouvement est *circulaire*, lorsque la trajectoire est une circonférence de cercle; *parabolique*, lorsque la trajectoire est une parabole.

§ 10. Le mouvement d'un corps ne serait qu'imparfaitement connu, si l'on se contentait d'observer la forme de la ligne que ce corps décrit : il faut encore examiner le mouvement sous le rapport du temps que le corps met à parcourir les diverses portions de cette ligne.

Les instruments qui servent à mesurer le temps sont connus de tout le monde : ce sont les horloges et les montres. Mais la véritable mesure du temps réside dans les phénomènes astronomiques. Ces phénomènes déterminent des intervalles de temps successifs, égaux entre eux, qu'on appelle des jours. Les horloges et les montres n'ont pas d'autre objet que de diviser le jour en un grand nombre de parties égales, et d'indiquer à un moment quelconque, à

iilles se mouvant sur un cadran, le nombre de ces par-
ont écoulées depuis le commencement de la journée. Le
se en 24 heures; chaque heure se subdivise en 60 mi-
haque minute en 60 secondes. En sorte que l'heure se
3600 secondes, et le jour de 86400 secondes.
naître complétement le mouvement d'un corps, on de-
r, par exemple, le chemin qu'il parcourt sur sa trajec-
nt une seconde; puis celui qu'il parcourt pendant une
conde; ensuite pendant une troisième seconde; et ainsi
ndant toute la durée du mouvement.
uvement uniforme, vitesse. — Si les chemins par-
lant des intervalles de temps égaux successifs sont égaux
et qu'il en soit ainsi, quels que soient ces intervalles de
minutes, des secondes, des quarts de seconde, etc., le
sera *uniforme.* Il est essentiel de faire attention à la
ie les chemins parcourus pendant des intervalles de temps
essifs soient égaux entre eux, *quels que soient ces inter-
nps :* si, par exemple, on trouvait que les chemins par-
dant des secondes successives sont égaux entre eux,
ndant la première demi-seconde le chemin parcouru
and que pendant la deuxième demi-seconde, le mouve-
rait pas uniforme. Ainsi l'aiguille des secondes d'une
ourt des divisions égales dans les secondes successives;
avoir parcouru très rapidement une des divisions, elle
instant, puis elle parcourt la division suivante, s'arrête
, et ainsi de suite: son mouvement n'est pas uniforme.
arant divers mouvements uniformes, on reconnaît qu'ils
uns des autres par le degré plus ou moins grand de ra-
si un convoi de wagons sur un chemin de fer a un mou-
s rapide qu'un bateau à vapeur qui descend une rivière;
de son côté, un mouvement plus rapide qu'une voiture
un cheval qui va au pas. Le degré plus ou moins grand
d'un mouvement uniforme se mesure par le chemin par-
ant l'unité de temps : c'est ce qu'on nomme la *vitesse*
ement. On dit, par exemple, que le convoi de wagons
) mètres par seconde ou 36 kilomètres par heure : cha-
ombres 10 et 36 représente la vitesse du convoi. Une
se peut être représentée par des nombres différents, sui-
adoptera telle ou telle unité de temps, telle ou telle
igueur. Aussi, quand on indique le nombre qui repré-
itesse, doit-on *toujours faire* connaître les unités de
longueur auxquelles il se rapporte. On ne dira pas une

vitesse 10, ou une vitesse de 10 mètres ; mais on dira une vitesse de 10 mètres par seconde.

§ 12. **Mouvement varié.** — Si les chemins parcourus par le corps, pendant des intervalles de temps successifs égaux entre eux, ne sont pas égaux, le mouvement est dit *varié*. Le mouvement d'un corps qui tombe est un mouvement varié ; il en est de même du mouvement d'un convoi de wagons, à l'approche de l'endroit où il doit s'arrêter.

Dans un mouvement varié, la rapidité du mouvement change d'un moment à l'autre. Si l'on conçoit qu'à un moment donné elle s'entretienne sans changer davantage, le mouvement deviendra uniforme ; la vitesse de ce mouvement uniforme sera ce qu'on appelle la vitesse du mouvement varié au moment considéré. Lorsqu'on est dans un convoi de wagons qui approche du point d'arrivée, on sent très bien que le mouvement se ralentit progressivement : on dit alors que la vitesse diminue ; et si elle était primitivement de 10 mètres par seconde, on conçoit qu'elle deviendra successivement de 9 mètres, de 8 mètres,........ de 1 mètre par seconde, pour finir par être tout à fait nulle, lorsque le convoi sera complétement arrêté. Si, à un moment donné, on dit que la vitesse est de 4 mètres par seconde, cela ne voudra pas dire que, pendant une seconde, le convoi parcourt une longueur de 4 mètres; mais cela signifiera que, si la rapidité du mouvement se conservait telle qu'elle est au moment considéré, le convoi parcourrait 4 mètres en une seconde.

§ 13. **Mouvement de rotation, vitesse angulaire.** — Un grand nombre de pièces qui font partie des machines ne peuvent que tourner autour d'un axe fixe. Telles sont les meules de rémouleur, les roues à chevilles disposées aux orifices des puits de carrières pour en extraire les pierres, les poulies, les roues dentées qui servent à transmettre le mouvement dans un grand nombre de machines, etc. Un pareil mouvement se nomme *mouvement de rotation*. Tous les points du corps qui tourne décrivent des circonférences de cercle situées dans des plans parallèles entre eux et perpendiculaires à l'axe de rotation ; les arcs de cercle décrits dans le même temps par différents points du corps sont d'autant plus grands que ces points sont plus éloignés de l'axe de rotation.

Si l'on imagine une perpendiculaire abaissée d'un point du corps qui tourne sur son axe de rotation, cette perpendiculaire fera successivement, pendant le mouvement, différents angles avec sa position primitive ; ce sont les angles dont le corps a tourné depuis le commencement de son mouvement. Lorsque les angles ainsi décrits par le corps, pendant des intervalles de temps successifs égaux

[redacted]

ont égaux, quels que soient ces intervalles de temps, on nouvement de rotation est uniforme. Dans ce cas, les oints du corps ont des mouvements circulaires et uni- leurs vitesses sont respectivement proportionnelles à ces à l'axe. On nomme *vitesse angulaire* l'angle dont le ie pendant l'unité de temps. Ainsi on dit que la terre, ouvement de rotation autour de la ligne des pôles, a une 15 degrés par heure : cela signifie qu'une ligne qu'on enée à l'intérieur de la terre, perpendiculairement à son un angle de 15 degrés en une heure.

ivements de rotation qu'on peut observer dans les ma- it ordinairement très rapides, on exprime la vitesse an- le nombre de tours effectués dans l'unité de temps : on exemple, une vitesse de 300 tours par minute, ou de seconde.

in corps, en tournant autour d'un axe, ne décrit pas des ux dans des intervalles de temps successifs égaux entre uvement de rotation est varié. On appelle vitesse angu- mouvement varié, à un instant quelconque, la vitesse an- mouvement de rotation uniforme que prendrait le corps, de cet instant, son mouvement cessait de s'accélérer ou itir.

NOTIONS GÉNÉRALES SUR LES FORCES.

ertie de la matière. — *Un corps qui est en repos ne mettre de lui-même en mouvement.*

s qui est en mouvement ne peut pas modifier de lui-même mouvement.

ier de ces deux principes est très clair, et sera admis ilté par tout le monde. On voit bien, il est vrai, les ani- iomme passer d'eux-mêmes de l'état de repos à l'état de t : mais cette propriété qu'ils possèdent n'appartient pas e dont ils sont formés ; elle dépend de cette partie im- de leur être qui leur donne la vie. Dès que la vie cesse, retrouve dans les mêmes conditions que les pierres, il n'est plus capable de passer de lui-même de l'état de tat de mouvement.

nd principe a besoin d'être expliqué pour être con- nt compris, et aussi pour être complétement admis. corps, réduit par la pensée à un point, se trouve certain *mouvement, et qu*'aucune cause extérieure ou *ne tend à modifier son* mouvement, il résulte de notre

principe que ce corps décrit nécessairement une ligne droite, et que les portions de cette ligne qu'il parcourt dans des temps égaux sont égales, c'est-à-dire que son mouvement est uniforme. En effet, lorsque le corps s'est déplacé pendant un instant, suivant une petite ligne, qu'on peut toujours regarder comme droite, il n'y a pas de raison pour que dans l'instant suivant il dévie de la direction de cette ligne, dans un sens plutôt que dans un autre. Lorsqu'on lance une bille sur un sol bien uni, elle se meut en ligne droite ; pour qu'elle dévie de cette ligne, il faut qu'elle rencontre un obstacle qui s'oppose à ce qu'elle continue à se mouvoir comme précédemment. On admettra peut-être plus difficilement que la vitesse du corps ne change pas : car, dans l'exemple qui vient d'être cité, d'une bille roulant sur le sol, on voit toujours le mouvement se ralentir peu à peu, et cesser complétement au bout de quelque temps. Mais on doit observer, que plus le sol est uni, plus la bille va loin, quoiqu'on la lance toujours de la même manière. Ce n'est pas la bille qui diminue d'elle-même sa vitesse ; mais ce sont les aspérités du sol, jointes à la résistance que la bille éprouve de la part de l'air, qui, en s'opposant au mouvement, le détruisent peu à peu et finissent par le faire disparaître tout à fait.

Il résulte encore du principe dont nous nous occupons, que si un corps tourne autour d'un axe fixe, sans qu'aucune cause vienne agir sur lui pour altérer son mouvement, il devra continuer à tourner indéfiniment avec la même vitesse angulaire. C'est ainsi qu'une meule de rémouleur, une fois mise en mouvement, et supposée soustraite à toute action extérieure, telle que le frottement de son axe sur son support, la résistance de l'air, la résistance produite par le corps qu'on aiguise sur sa surface, devra conserver indéfiniment un mouvement uniforme de rotation.

Ces deux principes, en vertu desquels un corps ne peut pas, de lui-même, passer de l'état de repos à l'état de mouvement, ni passer d'un état de mouvement à un autre, constituent ce qu'on appelle l'*inertie* de la matière.

§ 15. **Forces.** — Pour qu'un corps se mette en mouvement, ou bien pour qu'il prenne un mouvement différent de celui qu'il avait, il faut une cause : cette cause, quelle qu'elle soit, on la nomme *force*. *Une force est donc une cause quelconque de mouvement ou de modification de mouvement.*

Les forces dont nous aurons à nous occuper sont de diverses espèces :

1° *Lorsqu'on abandonne un corps qu'on tenait dans la main, il tombe sur la terre.* La force qui produit ce mouvement est la

[redacted]

les corps sont soumis à son action. C'est elle qui
uvement de l'eau dans les fleuves et les rivières.
léforme un corps solide, une lame d'acier par exem-
er la limite de l'élasticité, le corps abandonné à lui-
a forme primitive, les molécules du corps se meu-
, en vertu de certaines forces intérieures qui ten-
ir dans les positions respectives qu'elles avaient
soit en les rapprochant, soit en les éloignant. Lors-
un gaz, et qu'on lui donne ensuite la liberté de se
te en effet, ses molécules s'éloignent les unes des
es forces intérieures. Ces forces intérieures sont ce
les *forces moléculaires*, dont les unes sont attrac-
épulsives. Ce sont les forces moléculaires qui for-
de la puissance des machines à vapeur.
hénomènes électriques et magnétiques, on observe
des répulsions. Un bâton de cire à cacheter, frotté
ttire des barbes de plume ; un aimant attire un
Les forces qui produisent ces mouvements sont des
et *magnétiques*. Nous aurons à nous en occuper
lerons des machines électro-motrices.
quatrième espèce de force consiste dans celles qui
par l'homme et les animaux, que l'on confond sous
rs animés.

ions, tensions. — Une force qui est appliquée à
rmine pas toujours le mouvement de ce corps. Une
une table y reste immobile ; et cependant cette
se à l'action de la pesanteur : car si l'on imaginait
arût instantanément, elle tomberait aussitôt. Une
e à l'extrémité inférieure d'une corde dont l'extré-
est attachée à un point fixe, reste également im-
nberait immédiatement si l'on venait à couper la
s fois qu'une force ne produit pas le mouvement du
est appliquée, elle donne lieu à une *pression* ou à
pierre posée sur une table exerce une pression sur
ierre suspendue à une corde détermine une ten-
Un homme qui cherche à soulever un fardeau trop
erce une pression sur ce fardeau, dans les points
e ses mains.

— Lorsqu'un corps, soumis à la seule action de la
aintenu dans l'immobilité par un obstacle, la pres-
n qui en résulte est ce qu'on appelle le **poids** du
ien se garder de confondre les mots **pesanteur** et

poids : le mot pesanteur désigne la cause générale qui fait tomber les corps à la surface de la terre ; le mot poids indique un effet résultant de l'action de cette cause générale sur un corps en particulier.

Le poids d'un corps peut être rendu sensible à l'aide de l'instrument représenté par la *fig*. 2. Cet instrument est formé d'une lame d'acier, qui est recourbée en son milieu, et qui présente un certain degré de flexibilité ; à l'extrémité de la branche inférieure est fixé un arc de fer, qui passe librement dans une ouverture pratiquée dans la branche supérieure, et se termine par un anneau ; vers l'extrémité de la branche supérieure est fixé un autre arc de fer, qui passe dans une ouverture pratiquée dans la branche inférieure, et se termine par un crochet. Si l'on saisit cet instrument par l'anneau, et qu'on suspende un corps au crochet, le poids de ce corps fera fléchir le ressort, les extrémités se rapprocheront, et l'instrument prendra la forme représentée par la *fig*. 3.

Fig. 2.

Fig. 3.

En suspendant ainsi successivement différents corps au crochet, on verra que les extrémités du ressort se rapprocheront plus ou moins. Lorsqu'elles se rapprocheront de la même quantité, sous l'action des poids de différents corps, on dira que les poids de ces corps sont égaux entre eux. Si l'on suspend ensemble au crochet deux de ces corps de même poids, le ressort fléchira plus que lorsqu'on n'en suspendait qu'un seul. Tout corps qui, suspendu au crochet, produira la même flexion que ces deux corps réunis, sera dit avoir un poids double du poids de chacun d'eux. On dira de même que le poids d'un corps est triple, quadruple, etc., du poids d'un des premiers corps, lorsqu'il produira sur le ressort la même flexion que trois, quatre, etc., de ces premiers corps réunis ensemble.

Le gramme étant le poids d'un centimètre cube d'eau pure, prise à la température de son maximum de densité, il sera facile, à l'aide de l'instrument représenté par la *fig*. 2, de trouver combien de grammes pèse un corps. Pour plus de commodité, on marquera sur l'arc extérieur, qui aboutit à l'anneau, les points où devra s'arrêter l'extrémité du ressort, lorsqu'on suspendra au crochet des poids de 1 gramme, 2 grammes, 3 grammes, etc.

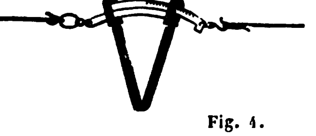
Il est bien clair qu'un seul ressort ne pourra pas servir pour peser les corps légers et les corps très lourds : le poids qu'on suspendra au crochet ne devra jamais être capable de dépasser la limite de l'élasticité du ressort, sans quoi l'instrument se détériorerait. On prendra

[redacted]

donc des ressorts très flexibles pour les corps légers, et des ressorts de moins en moins flexibles, à mesure qu'ils seront destinés à peser des corps plus lourds. Mais le principe de la mesure du poids d'un corps à l'aide de ces différents ressorts restera le même.

Lorsque le poids d'un corps se compose d'un grand nombre de grammes, on l'évalue ordinairement en kilogrammes (le kilogramme vaut 1000 grammes); c'est le kilogramme que nous prendrons le plus habituellement pour unité de poids. On emploie quelquefois une unité plus grande, la tonne, qui vaut 1000 kilogrammes.

§ 18. **Mesure des forces, dynamomètres.** —Quelle que soit la force qui détermine une pression ou une tension, cette pression ou cette tension pourra être assimilée au poids d'un corps, et évaluée en kilogrammes. Si un cheval tire une corde attachée à un corps qu'il cherche à mettre en mouvement, on peut concevoir que la corde soit coupée en un point, et que les deux bouts ainsi séparés soient attachés, *fig.* 4, l'un à l'anneau, l'autre au crochet de l'instrument décrit précédemment; la force de traction sera ainsi exercée par l'intermédiaire de cet instrument, le ressort fléchira et la tension de la corde sera équivalente au poids du corps qui, étant suspendu au ressort, le fléchirait de la même quantité. Cette tension pourra donc être représentée par un certain nombre de kilogrammes.


Fig. 4.

On prend pour mesure d'une force, la grandeur de la pression ou la tension qu'elle produit, lorsqu'elle agit sur un corps qui ne peut se déplacer. Ainsi la force qui fait tomber un corps est mesurée par le poids de ce corps; ainsi, dans l'exemple qu'on vient de prendre, la force développée par le cheval est mesurée par la tension de la corde. Une force quelconque pourra donc toujours être représentée par un certain nombre de kilogrammes.

Pour trouver le nombre de kilogrammes qui représente une force, il suffira de la faire agir sur un ressort pareil à celui de la *fig.* 2. Mais on pourra aussi employer pour cela des ressorts de formes différentes, tels que ceux qui sont représentés par les *fig.* 5 et 6. Le premier, *fig.* 5, est un ressort contourné en hélice, ou ce que l'on nomme un ressort à boudin, qui est enfermé dans un cylindre. Une tige, qui le traverse dans toute sa longueur, suivant l'axe du cylindre, se termine inférieurement par une tête sur laquelle s'appuie l'une des

Fig. 5.

extrémités du ressort; l'autre bout de cette tige est muni d'un anneau qui sert à suspendre l'instrument. Le cylindre, qui appuie sur l'extrémité supérieure du ressort, porte un crochet auquel on applique la force qu'il s'agit de mesurer. La tige sort plus ou moins du cylindre, suivant qu'il est soumis à une force de traction plus ou moins grande : on la gradue d'avance, en suspendant à son crochet des corps dont les poids sont connus.

La *fig.* 6 représente deux lames de ressorts, dont les extrémités sont réunies dans deux espèces de chapes à l'aide de boulons ; un anneau est attaché à l'une des lames, et un crochet à l'autre lame. Les milieux de ces deux lames s'écartent plus ou moins l'un de l'autre, suivant que la force de traction exercée sur le crochet est plus ou moins grande.

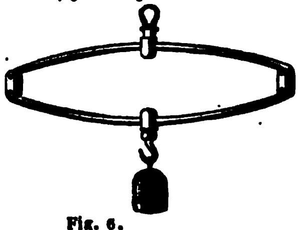


Fig. 6.

Tous ces instruments, *fig.* 2, 5 et 6, portent le nom de *dynamomètres* (de δυναμις, force, et μετρον, mesure). Le dernier, *fig.* 6, imaginé par M. Poncelet, jouit d'une propriété précieuse pour les recherches expérimentales sur la grandeur des forces développées dans diverses circonstances : c'est que l'augmentation de la distance des points milieux des lames est proportionnelle à la grandeur de la force appliquée au dynamomètre. Si une force de 1 kilogramme a augmenté la distance de ces points d'un millimètre, une force de 2 kilogrammes l'augmentera de 2 millimètres, une force de 3 kilogrammes l'augmentera de 3 millimètres, et ainsi de suite, mais seulement jusqu'à une certaine limite que la grandeur de la force ne devra pas dépasser.

§ 19. **Direction d'une force.** — On appelle *direction d'une force*, la direction du mouvement que cette force communiquerait à un corps, dans le cas où ce corps, primitivement en repos, pourrait céder librement à l'action de la force, sans qu'aucun obstacle le gênât dans son mouvement. Un corps qu'on tient dans la main, et qu'on abandonne ensuite à lui-même, tombe en parcourant une ligne droite verticale ; cette verticale est la direction de la force qui le fait tomber.

Pour représenter d'une manière sensible les diverses forces qui agissent sur un corps, ou sur un ensemble de corps, on trace, par le point d'application de chacune d'elles, une ligne droite qui indique sa direction, et l'on porte sur ces diverses lignes droites, à partir des *points d'application des forces*, et dans le sens de leur action, des

longueurs proportionnelles à ces forces. Si l'on convient, par exemple, de représenter une force de 1 kilogramme par une longueur de 1 centimètre, la *fig.* 7 indique que le corps M est soumis à des forces P, Q, R, égales respectivement à 2^k, 3^k, 1^k, appliquées aux points A, B, C, et dirigées suivant les lignes droites qui partent de ces trois points. Souvent, pour fixer plus clairement le sens dans lequel agit une force, on termine par une flèche la ligne qui la représente, ainsi que le montre la *fig.* 7.

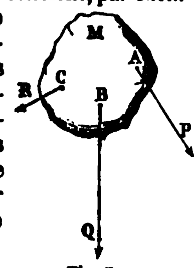


Fig. 7.

COMPOSITION DES FORCES.

§ 20. **Résultante, composantes.**—Lorsque plusieurs forces agissent sur un même corps solide, il arrive souvent qu'on peut trouver une autre force qui, agissant seule sur le corps, soit capable de produire exactement le même effet.

Plusieurs chevaux étant attelés à une voiture, on conçoit qu'on puisse les remplacer par un moteur unique, une locomotive, par exemple, qui tire la voiture et donne lieu au même mouvement ; la force de traction de la locomotive produira le même effet que les forces développées simultanément par les chevaux.

La force unique, dont l'action peut ainsi être substituée à l'action simultanée de plusieurs autres forces, sans que l'effet soit changé, se nomme la *résultante* de ces forces; celles-ci à leur tour, par opposition, prennent le nom de *composantes*. La composition des forces a pour objet de déterminer la résultante, lorsque l'on connaît les composantes.

§ 21. **Équilibre.**—Avant d'exposer les règles de la composition des forces, il est nécessaire de définir le mot *équilibre*, dont nous aurons souvent à nous servir. Il peut arriver que plusieurs forces, agissant sur un corps, ou sur un ensemble de corps, se neutralisent mutuellement, en sorte que les choses se passent de la même manière que si les forces n'agissaient pas : on dit alors que ces forces *se font équilibre*, ou bien que le corps ou l'ensemble de corps auquel ces forces sont appliquées *est en équilibre*.

On doit bien distinguer le mot *repos* du mot *équilibre*. Le premier indique l'état d'un corps qui ne se déplace pas ; il n'y entre aucune idée de forces. Le second désigne l'état d'un corps qui, étant soumis à l'*action de plusieurs forces*, se trouve dans les mêmes conditions *que si ces forces n'agissaient pas*. Un corps peut être animé

d'un mouvement, sans être soumis à l'action d'aucune force (§ 14); si l'on vient à lui appliquer des forces qui se font équilibre, son mouvement n'en sera nullement troublé, puisque ces forces se détruisent mutuellement : l'équilibre des forces appliquées à un corps n'entraîne donc pas l'idée de l'immobilité du corps. Ainsi les mots repos et équilibre ont des significations essentiellement différentes.

§ 22. **Équilibre stable, équilibre instable.** — L'acception qu'on donne vulgairement au mot équilibre n'est pas la même que celle que nous lui attribuons ici. On dit qu'on a mis un corps en équilibre, lorsqu'on est parvenu à lui donner une position dans laquelle il reste immobile, mais dont il s'éloigne immédiatement sous l'action de la plus petite cause extérieure. Si l'on a pu, par exemple, placer un cône sur une table, en l'appuyant seulement par son sommet, *fig.* 8, sans qu'il tombe d'un côté ni d'un autre, on dit qu'on a mis ce cône en équilibre. Pour nous, le cône est aussi bien en équilibre lorsqu'il repose sur la table par sa base, *fig.* 9, que par son sommet. Dans l'un et l'autre cas, la force qui tend à faire tomber le cône, qui le ferait tomber si la table ne le soutenait pas, est mise en équilibre par la pression que la table exerce de bas en haut sur la partie inférieure du cône. Ce qui distingue ces deux cas, c'est que dans l'un, *fig.* 8, pour peu qu'on dérange le cône, il ne reprendra pas la position qu'il avait : l'équilibre est *instable*. Tandis que dans l'autre, *fig.* 9, si l'on dérange un peu le cône, en tirant son sommet d'un côté quelconque, il reprendra immédiatement sa position primitive : l'équilibre est *stable*. Ainsi ce qu'on appelle vulgairement équilibre, pour nous c'est l'équilibre instable.

Fig. 8.

Fig. 9.

§ 23. **Forces agissant suivant une même direction.** — Si un corps est soumis à l'action de trois forces, une de 3^k, une de 5^k, et une de 6^k, appliquées au point A, *fig.* 10, suivant une même direction AB, et dans le même sens, ce corps est dans les mêmes conditions que si, la ligne AB étant verticale, trois poids de 3^k, de 5^k et de 6^k, étaient suspendus au point A. Or il résulte de ce qui a été dit précédemment (§ 17), qu'un poids unique de 14^k (14 est la somme des nombres 3, 5 et 6) *produira le même effet* sur le point A : on peut donc dire que des *forces, en nombre quelconque*, appliquées à un même point, dans

A

B

Fig. 10.

[redacted]

une même direction, et dans un même sens, ont une résultante égale à leur somme, et agissant dans la direction et dans le sens des composantés.

Si un corps est soumis à l'action de deux forces égales, appliquées à un même point, suivant la même direction, mais en sens contraires, il est clair que ces deux forces se font équilibre.

Considérons un corps soumis à l'action de trois forces, une de 3^k, une autre de 5^k, et une troisième de 6^k, agissant sur le point A, *fig.* 11, dans le sens AB, et à deux forces, de 4^k et de 7^k, dans le sens contraire AC. On pourra remplacer les trois premières forces par une force de 14^k agissant dans le sens AB, et les deux dernières par une force de 11^k agissant dans le sens AC. Mais la force de 14^k peut être regardée comme provenant de la composition d'une force de 11^k, et d'une autre de 3^k, agissant toutes deux suivant AB : la première de ces deux composantes est détruite par la force égale, qui agit en sens contraire, et il ne reste plus que la force de 3^k, agissant dans le sens AB, qui tient complétement lieu des cinq forces données. Il résulte de là que, pour composer plusieurs forces agissant sur un point, suivant une même direction, mais dans des sens différents, il faut faire la somme des forces qui tirent dans un sens, et la somme des forces qui tirent en sens contraire; puis retrancher la plus petite de ces deux sommes de la plus grande : la différence représentera la résultante de toutes les forces données, résultante qui agira dans le sens de la plus grande des deux sommes qu'on aura obtenues.



Fig. 11.

Si plusieurs forces, agissant sur un corps suivant une même ligne droite, étaient appliquées en différents points de cette ligne droite, on devrait les traiter comme si elles étaient toutes appliquées à un même point : car il est clair que l'action d'une force reste la même, lorsqu'on l'applique successivement en différents points de sa direction.

§ 24. **Forces parallèles.**—Pour démontrer la composition des forces agissant suivant des directions parallèles, nous nous servirons de l'appareil suivant. Une barre prismatique de bois AB, *fig.* 12, est suspendue en son milieu, à l'aide d'un couteau d'acier qui la traverse et fait saillie des deux côtés. L'arête de ce couteau, tournée vers le bas, s'appuie sur deux plans d'acier fixés dans une chape qui est adaptée au support CD : en sorte que la barre peut tourner librement autour de cette arête. La face anté-

rieure de cette barre porte 10 divisions d'égale longueur, de chaque côté du point de suspension ; et, au-dessous des points de division, sont disposés de petits anneaux, auxquels on peut accrocher des poids, tellement construits qu'on puisse d'ailleurs les suspendre les uns au-dessus des autres.

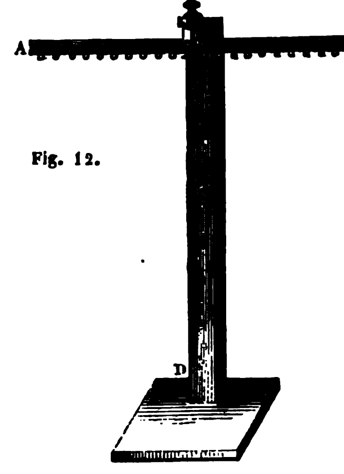
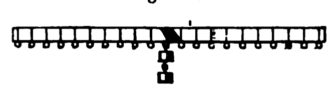


Fig. 12.

Si l'on accroche d'abord deux poids égaux, de chacun 100 grammes par exemple, en deux points également éloignés du milieu de la barre, *fig.* 13, on voit qu'elle demeure horizontale. Si l'on enlève ces deux poids, et qu'on les accroche l'un au-dessous de l'autre, au milieu même de la barre, *fig.* 14, elle demeure encore horizontale; et l'on admettra aisément que, dans l'un et l'autre cas, le couteau presse de la même manière les petits plans d'acier qui le supportent. Si l'on conservait quelque doute sur ce dernier fait, il suffirait de suspendre la chape qui porte les plans d'acier à un ressort dynamométrique, et l'on verrait ce ressort fléchir de la même quantité dans les deux cas. La *fig.* 13 représente la barre soumise à l'action de deux forces égales et parallèles : on conclut de ce qui précède, que ces deux forces peuvent être remplacées par une force unique, double de chacune d'elles, et appliquée au milieu de la ligne droite qui joint leurs points d'application.

Fig. 13.


Fig. 14.

Imaginons maintenant qu'on suspende à la barre AB, *fig.* 12, 11 poids de chacun 1 hectogramme, également espacés le long de cette barre, et dont celui du milieu correspondra au point de suspension de la barre, ainsi que le montre la *fig.* 15. La barre, ainsi régulièrement chargée, se maintiendra dans une position horizontale. Mais, d'après ce qu'on vient de voir, on peut prendre deux de ces

[redacted]

poids, placés à égale distance du milieu, et les suspendre au milieu, sans que l'effet produit sur la barre cesse d'être le même : elle restera toujours horizontale, et pressera toujours également la chape qui la supporte. En transportant ainsi successivement deux à deux, au milieu de la barre, les poids qui étaient répartis uniformément dans sa longueur, on finira par obtenir la disposition que représente la *fig.* 16 ; et l'on en conclura que la barre AB, chargée de 11 poids égaux, de chacun 1 hectogramme, régulièrement répartis sur toute sa longueur, se trouve dans les mêmes conditions que lorsqu'elle est chargée d'un poids unique de 11 hectogrammes suspendu à son milieu.

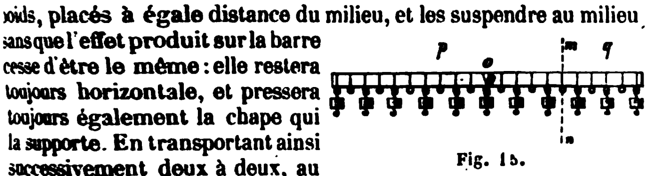


Fig. 15.

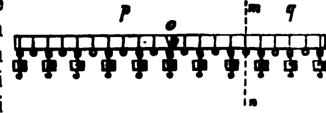


Fig. 16.

Reprenons la barre régulièrement chargée de la *fig.* 15, et divisons les 11 poids qu'elle porte en deux groupes, par la ligne *mn*, qui en laisse 8 à gauche et 3 à droite. Les 8 poids de gauche peuvent être réunis, d'après ce qu'on vient de voir, au point *p*, milieu de la longueur sur laquelle ils sont régulièrement répartis ; les 3 poids de droite pourront également être réunis au point *q*, par la même raison : et la barre présentera la disposition de la *fig.* 17, sans cesser d'être dans les mêmes conditions. Donc deux poids, l'un de 8 hectogrammes, et l'autre de 3 hectogrammes, accrochés, le premier en *p*, le second en *q*, produisent le même effet qu'un poids unique de 11 hectogrammes accroché en *o*. Si l'on observe de plus que *op* contient 3 divisions de la barre, et que *oq* en contient 8, on pourra en conclure la proposition suivante : *Deux forces parallèles, appliquées à un corps solide, ont une résultante égale à leur somme, parallèle à chacune d'elles, et dont le point d'application divise la distance des points d'application des composantes en deux parties qui sont inversement proportionnelles aux grandeurs de ces composantes.*

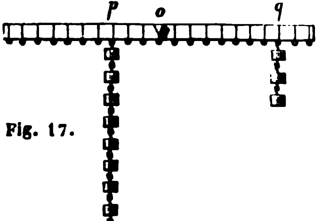


Fig. 17.

§ 25. Soit un corps M, fig. 18, soumis à l'action de quatre forces

parallèles, dont l'une de 3^k est appliquée au point A ; une autre de 5^k est appliquée au point B ; une troisième de 4^k est appliquée au point C, et enfin une quatrième de 1^k est appliquée au point D. Les deux forces appliquées aux points A et B peuvent être remplacées par une force de 8^k, appliquée au point O, qui est tel qu'on a

$$\frac{OA}{OB}=\frac{5}{3},$$

Cette force de 8^k peut être composée avec la force appliquée au point C, et il en résultera une force de 12^k, appliquée au point O'. Enfin cette nouvelle résultante partielle se composera avec la force appliquée au point D, et l'on obtiendra définitivement une force de 13^k, appliquée au point O'', et qui sera la résultante de toutes les forces données. On voit par là comment on pourra toujours composer en une seule, des forces parallèles et de même sens, quel que soit leur nombre; la résultante qu'on obtiendra sera toujours égale à la somme des composantes.

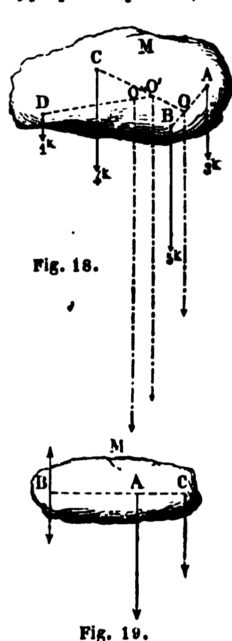


Fig. 18.

Fig. 19.

§ 26. Si un corps M, *fig.* 19, est soumis à l'action de deux forces parallèles et de sens contraires, l'une de 11^k appliquée en A, et l'autre de 4^k appliquée en B, on trouvera leur résultante de la manière suivante. On regardera la plus grande des deux forces, celle de 11^k, comme provenant de la composition d'une force de 4^k appliquée en B, et d'une force de 7^k appliquée en un point C qu'on déterminera aisément : pour cela on prolongera BA, et l'on prendra la distance AC telle qu'on ait

$$\frac{AC}{AB}=\frac{4}{7}.$$

La force de 11^k étant remplacée par ses deux composantes, on aura au point B deux forces de 4^k chacune, et de sens contraires, qui se détruiront ; et il ne restera plus qu'une force de 7^k, appliquée au point C, qui sera la résultante des deux forces données.

Si les deux forces parallèles et de sens contraires étaient égales, on ne pourrait pas trouver une force unique qui pût complétement les remplacer ; ces deux forces n'auraient pas de résultante.

§ 27. Lorsqu'un corps sera soumis à l'action d'autant de forces

[redacted]

parallèles qu'on voudra, agissant les unes dans un sens, les autres en sens contraire, on cherchera la résultante des premières, puis celle des dernières, et l'on obtiendra ainsi deux résultantes partielles, agissant en sens contraires et dans des directions parallèles. Il n'y aura plus ensuite qu'à composer entre elles ces deux résultantes partielles, conformément à ce qui a été dit dans le § 26. Cette dernière composition pourra toujours s'effectuer, à moins que les deux résultantes partielles ne soient égales, et n'agissent pas suivant la même ligne droite : dans ce cas exceptionnel, les forces données n'auront pas de résultante.

§ 28. **Du levier.** —Avant d'aller plus loin, nous appliquerons ce qui précède à la recherche du principe du *levier*, principe qui nous servira ensuite pour trouver la résultante de deux forces appliquées à un même point, suivant des directions différentes.

Le levier est une barre AB, *fig.* 20, à l'aide de laquelle on soulève un corps pesant M, qui porte sur l'extrémité A, en exerçant un effort à l'autre extrémité B. Cette barre est appuyée en C, sur l'arête d'un support, autour de laquelle elle peut tourner, lorsque l'effort appliqué en B est suffisamment grand. Supposons que le corps M, déjà soulevé d'une petite quantité, soit maintenu immobile, à l'aide du levier, dans la position qui lui a été donnée : le levier se trouvera soumis à l'action de deux forces, dont l'une est la pression que le corps M exerce en A, et l'autre est l'effort appliqué en B pour empêcher le corps M de retomber. Ces deux forces, que nous regarderons comme parallèles, peuvent, d'après ce qui précède, être remplacées par une force unique, produisant le même effet sur le levier. Cette force unique doit passer par le point C : car, s'il en était autrement, si elle était dirigée à gauche ou à droite de ce point, suivant *mn*, ou suivant *pq*, le levier tournerait nécessairement autour du point C, à gauche ou à droite, sous l'action de cette force qui lui serait seule appliquée. L'immobilité du levier, sous l'action simultanée des deux forces qui lui sont appliquées en A et en B, exige donc *que la résultante de ces deux forces* passe par le point C. Mais *on sait que, pour cela, il faut que les forces* soient inversement pro-

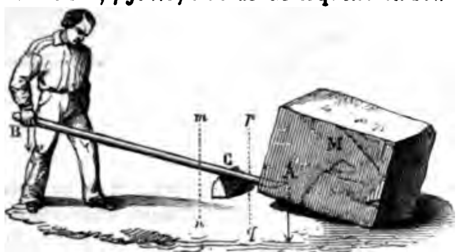


Fig. 20.

portionnelles aux distances AC et BC, qu'on nomme les
levier. Si CB est 10 fois, 100 fois, 1000 fois plus grand
l'effort qu'on devra exercer en B sera 10 fois, 100 fois, 1
plus petit que la pression supportée en A par le levier, et à
il s'agira de faire équilibre. De là le principe suivant : *Deu*
agissant sur un levier, se font équilibre, lorsqu'elles sont e
dans le rapport inverse des bras de levier, aux extrémités
elles sont appliquées.

Ce principe a été découvert par Archimède, qui en a
toute l'importance par ce mot bien connu : « Qu'on me c
levier et un point d'appui, et je soulèverai le monde. »

§ 29. Le levier, sur lequel a été fait le raisonnement p
était supposé droit, et soumis à l'action de deux forces p
l'une à l'autre. Examinons maintenant un levier coudé ACB
aux e
duquel
pliquées
ces, res
mentper
laires au
levier A
Imagino
bras de levier BC soit supprimé, et qu'on le remplace pa
de levier B′C, de même longueur, mais dirigé suivant le p
ment du bras de levier AC : le levier coudé ACB se trouv
placé par un levier droit ACB′. On admettra sans peine qu
applique en B′, perpendiculairement à B′C, la force qui éta
quée en B, elle agira de la même manière, pour faire tourn
vier autour du point d'appui C ; et que, dans l'un et l'autre
devra avoir la même grandeur, pour faire équilibre à la forc
appliquée au point A. Mais nous avons trouvé que, pour l'
du levier droit soumis à l'action de deux forces parallèles,
que les forces fussent inversement proportionnelles aux br
vier aux extrémités desquels elles agissent : il en sera donc
du levier coudé, soumis à l'action de forces dirigées per
lairement aux bras de ce levier.

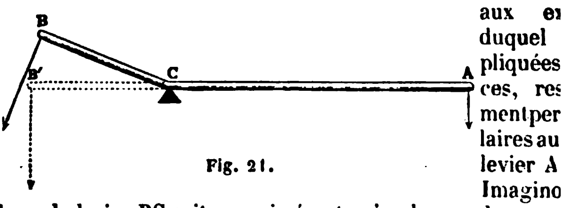


Fig. 21.

Il arrivera souvent que les forces appliquées à un levier,
coudé, ne seront pas dirigées perpendiculairement à leurs
levier. Dans ce cas, si l'on imagine, *fig.* 22, des perpend
CA′, CB′, abaissées du point d'appui C sur les directions
forces, on pourra regarder les forces comme étant dans le
conditions que si elles étaient appliquées aux extrémités

ı'CB' ; et l'on en conclura que, pour qu'il y ait équilibre, il ɜ les forces soient inversement proportionnelles aux lon- des perpendiculaires CA' et CB'. On voit donc que, pour ɪrincipe du ɨnoncé pré- nent, con- à tous les faut qu'on ɜ par bras ɜr, aux ex- s desquels

Fig. 22.

ɜs sont appliquées, les perpendiculaires abaissées du point i sur les directions des forces.

. Lorsqu'un levier ABC, *fig.* 23, aura son point d'appui à le ses extrémités C, soumis à deux forces ıées en A et B, dans rections parallèles, ı sens contraires, on considérer CA et ɪme deux bras de le-

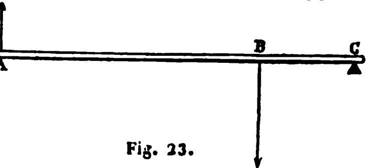


Fig. 23.

ɪx extrémités desquels ces forces agissent, et l'équilibre ɜu lorsque les forces seront inversement proportionnelles à ıs de levier. On peut donner la brouette, *fig.* 24, comme e de ce genre de le- e point d'appui est e la roue ; l'une des appliquées est le lu corps placé dans ɜtte ; et l'autre force ésultante des deux ns exercées de bas t par les mains de ıe qui tient les man- ɜ cette brouette.


Fig. 24.

. Dans tout ce que nous venons de dire, relativement au le- ɔus l'avons toujours regardé comme étant un corps solide de nvariable. Il n'en est pas réellement ainsi : un effort, quelque ı'il soit, déforme toujours un peu le corps auquel il est ap- Lorsqu'un levier est soumis à l'action de certaines forces, il nce par fléchir, *puis il conserve la* nouvelle forme qu'il a prise, *e les forces agissent sur lui*; il se trouve alors dans les

mêmes conditions que s'il n'avait jamais eu d'autre forme que c
que les forces lui ont donnée, et l'on peut lui appliquer, en toute ri-
gueur, ce qui a été dit précédemment pour un levier de forme inva-
riable. Il est clair que, quand on voudra se servir d'un levier, on de
toujours le prendre assez solide pour que la déformation qu'il épr
vera, sous l'action des forces, ne dépasse pas la limite de son élasticité.

§ 32. **Forces appliquées à un point dans diverses direc-
tions.**—Il est aisé de reconnaître que deux forces, appliquées à un
même point, dans deux directions différentes, ont une résultante.
Imaginons pour cela qu'une corde ACB, *fig.* 25, ait été attachée, par
ses deux extrémités, en deux points fixes A et B; et qu'au point C on
ait suspendu un poids de 10^k, à l'aide d'une autre corde CD. Le poids
se placera de manière que la corde CD soit verticale; les deux por-
tions AB, et CB de la première corde seront tendues, et leurs tensions seront des forces appliquées au point C, suivant CA et CB, qui maintiendront en équilibre le poids de 10^k. Mais ce poids serait également tenu en équilibre par une force unique de 10^k, agissant sur le point C, verticalement et de bas en haut, suivant CD′ : cette dernière force produirait donc, à elle seule, le même effet que les forces dirigées suivant CA et CB, agissant ensemble, et par suite elle est leur résultante.



Fig. 25.

§ 33. Soit M, *fig.* 26, un corps soumis à l'action de deux forces, l'une de 3^k, l'autre de 5^k, représentées en grandeur et en direction par les lignes droites AB, AC. *Pour trouver la résultante de ces deux forces, on construira le parallélogramme* ABCD; *la diagonale* AD *représentera cette résultante, en grandeur et en direction.* Nous diviserons en deux parties la démonstration de cette proposition, et nous commencerons par prouver que la résultante des deux forces données est dirigée suivant la diagonale AD.



Fig. 26.

Nous avons un moyen bien simple de reconnaître si la résultante des forces AB et AC est dirigée suivant AD : c'est de supposer que le point D du corps soit fixe, et que le corps ne puisse que tourner autour de ce *point.* Si la résultante passe, en effet, par le point D, la *fixité de ce point* détruira complétement son action, et le corps res-

tera en équilibre ; il sera donc aussi en équilibre, lorsqu'au lieu de la résultante, ce seront les composantes AB et AC qui agiront sur lui. Si, au contraire, la résultante des forces données passait à gauche ou à droite du point D, si elle était dirigée suivant AE ou AF, on ne mettrait pas le corps en équilibre, en fixant le point D, puisque cette résultante tendrait à le faire tourner à gauche ou à droite, et que rien ne s'opposerait à ce qu'il tournât réellement : le corps ne serait donc pas en équilibre sous l'action des forces AB et AC, qui doivent produire le même effet que leur résultante. Or si nous abaissons du point D, qui est supposé fixe, des perpendiculaires DG, DH sur les directions des deux forces, nous pourrons regarder ces forces comme étant dans les mêmes conditions que si elles agissaient sur un levier coudé, dont les bras seraient DG et DH. D'ailleurs les deux triangles DBG, DCH sont semblables, puisqu'ils sont rectangles, et que les angles en B et en C sont égaux ; ils fourniront donc la proportion

$$\frac{CD}{BD} = \frac{DH}{DG},$$

ou bien, en observant que CD est égal à AB, et que BD est égal à AC, comme côtés opposés d'un parallélogramme,

$$\frac{AB}{AC} = \frac{DH}{DG}.$$

Donc les forces AB et AC sont inversement proportionnelles à leurs bras de levier DG et DH, et par suite ces deux forces se font équilibre. On doit en conclure, d'après ce qu'on vient de dire, que la résultante de ces deux forces passe par le point D, c'est-à-dire qu'elle est dirigée suivant la diagonale AD.

Pour la démonstration précédente, la *fig*. 26 a été faite de manière que le point D fasse partie du corps M, auquel les forces AB et AC sont appliquées : mais il est clair que la direction de la résultante de ces forces ne dépend, en aucune manière, de la forme ni des dimensions du corps sur lequel elles agissent, et que, dans tous les cas, cette direction sera celle de la diagonale du parallélogramme formé sur les deux lignes droites qui représentent les composantes en grandeur et en direction.

§ 34. Passons à la seconde partie de la proposition énoncée au commencement du § 33, qui consiste en ce que la résultante des deux forces AB et AC est représentée en grandeur par la diagonale AD. Nous observerons d'abord que, quand on connaît les directions de deux forces appliquées à un point, la direction de leur résultante, et la grandeur de l'une des composantes, on peut, par ce qui précède, trouver la grandeur de l'autre composante. Soit ACB, *fig*. 27, une corde dont une extrémité est fixée au point A, et dont on tire

l'autre extrémité B; au point C de cette corde est suspendu un poids, et la force de traction exercée au point B, pour maintenir ce poids en équilibre, est mesurée par un dynamomètre. On sait que les tensions des cordons CA et CB ont une résultante dirigée suivant

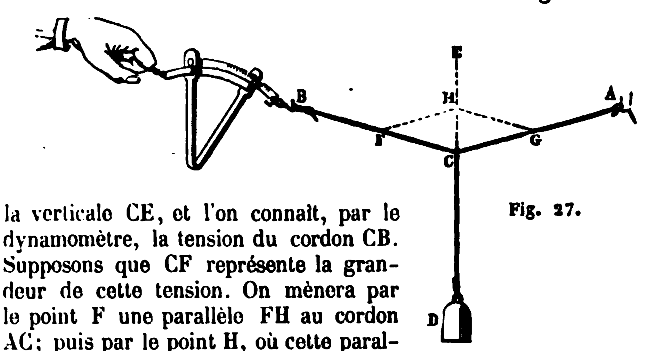


Fig. 27.

la verticale CE, et l'on connaît, par le dynamomètre, la tension du cordon CB. Supposons que CF représente la grandeur de cette tension. On mènera par le point F une parallèle FH au cordon AC; puis par le point H, où cette parallèle coupe la direction CE de la résultante, on mènera une parallèle HG au cordon CB : la longueur CG représentera la grandeur de la tension du cordon AC. On voit, en effet, que si cette tension était représentée par une longueur plus grande ou plus petite que CG, la résultante ne serait pas dirigée suivant la diagonale du parallélogramme construit sur les lignes qui représentent les composantes.

Lorsqu'un corps M, *fig*. 28, est soumis à l'action de deux forces AB, AC, ces deux forces ont une résultante, qui est dirigée suivant la diagonale AD du parallélogramme ABDC, ainsi que nous l'avons démontré. Si nous appliquons au corps, suivant AF, une force égale et directement opposée à la résultante, elle fera équilibre à cette résultante, et sera par conséquent capable de faire aussi équilibre à ses composantes : ainsi le corps M, soumis à l'action des forces AB, AC, et d'une force agissant suivant AF, et égale à la résultante que nous cherchons, se trouvera en équilibre. La force AC, faisant équilibre aux deux autres, mettrait également en équilibre leur résultante : donc la résultante de la force AB, et de la force appliquée suivant AF, est dirigée suivant la ligne AE, prolongement de AC. Ainsi nous *connaissons les directions* AB, AF de deux forces, la direction AE

Fig. 28.

esentera la grandeur de la force dirigée suivant cette
i la grandeur de la résultante que nous cherchons,
force AF lui est égale et contraire. Mais ABEF
llélogramme, AF est égal à BE; de plus, à cause du
me ADBE, le côté BE est égal au côté AD : donc
AF, et l'on peut en conclure que AD représente en
ésultante des deux forces AB et AC.

de ce que nous venons de démontrer, nous sommes
énoncer la proposition suivante : *La résultante de deux
tées à un point, suivant des directions différentes, est re-
grandeur et en direction par la diagonale du parallélo-
truit sur les lignes droites qui représentent les compo-*
proposition est habituellement désignée sous le nom
ramme des forces.

rrive souvent qu'une force étant donnée, on a besoin de
par deux autres forces agissant suivant des directions
et dont elle serait la résultante ; c'est ce que l'on ap-
oser la force donnée en deux composantes, dont les di-
connues. Cette décomposition se fera facilement, à l'aide
ramme des forces. Soit
la ligne qui représente
iée, appliquée au point
'agit de décomposer en
forces agissant dans les
C et AD. Par le point



mêmes conditions que s'il n'avait jamais eu d'autre forme que celle que les forces lui ont donnée, et l'on peut lui appliquer, en toute rigueur, ce qui a été dit précédemment pour un levier de forme invariable. Il est clair que, quand on voudra se servir d'un levier, on devra toujours le prendre assez solide pour que la déformation qu'il éprouvera, sous l'action des forces, ne dépasse pas la limite de son élasticité.

§ 32. **Forces appliquées à un point dans diverses directions.**—Il est aisé de reconnaître que deux forces, appliquées à un même point, dans deux directions différentes, ont une résultante. Imaginons pour cela qu'une corde ACB, *fig.* 25, ait été attachée, par ses deux extrémités, en deux points fixes A et B; et qu'au point C on ait suspendu un poids de 10^k, à l'aide d'une autre corde CD. Le poids se placera de manière que la corde CD soit verticale; les deux portions AB, et CB de la première corde seront tendues, et leurs tensions seront des forces appliquées au point C, suivant CA et CB, qui maintiendront en équilibre le poids de 10^k. Mais ce poids serait également tenu en équilibre par une force unique de 10^k, agissant sur le point C, verticalement et de bas en haut, suivant CD′ : cette dernière force produirait donc, à elle seule, le même effet que les forces dirigées suivant CA et CB, agissant ensemble, et par suite elle est leur résultante.



Fig. 25.

§ 33. Soit M, *fig.* 26, un corps soumis à l'action de deux forces, l'une de 3^k, l'autre de 5^k, représentées en grandeur et en direction par les lignes droites AB, AC. *Pour trouver la résultante de ces deux forces, on construira le parallélogramme* ABCD ; *la diagonale* AD *représentera cette résultante, en grandeur et en direction.* Nous diviserons en deux parties la démonstration de cette proposition, et nous commencerons par prouver que la résultante des deux forces données est dirigée suivant la diagonale AD.

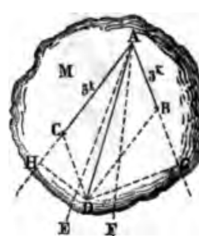


Fig. 26.

Nous avons un moyen bien simple de reconnaître si la résultante des forces AB et AC est dirigée suivant AD : c'est de supposer que le point D du corps soit fixe, et que le corps ne puisse que tourner autour de ce point. Si la résultante passe, en effet, par le point D, la *fixité de ce point* détruira complétement son action, et le corps res-

[redacted]

tera en équilibre ; il sera donc aussi en équilibre, lorsqu'au lieu de la résultante, ce seront les composantes AB et AC qui agiront sur lui. Si, au contraire, la résultante des forces données passait à gauche ou à droite du point D, si elle était dirigée suivant AE ou AF, on ne mettrait pas le corps en équilibre, en fixant le point D, puisque cette résultante tendrait à le faire tourner à gauche ou à droite, et que rien ne s'opposerait à ce qu'il tournât réellement : le corps ne serait donc pas en équilibre sous l'action des forces AB et AC, qui doivent produire le même effet que leur résultante. Or si nous abaissons du point D, qui est supposé fixe, des perpendiculaires DG, DH sur les directions des deux forces, nous pourrons regarder ces forces comme étant dans les mêmes conditions que si elles agissaient sur un levier coudé, dont les bras seraient DG et DH. D'ailleurs les deux triangles DBG, DCH sont semblables, puisqu'ils sont rectangles, et que les angles en B et en C sont égaux ; ils fourniront donc la proportion

$$\frac{CD}{BD} = \frac{DH}{DG},$$

ou bien, en observant que CD est égal à AB, et que BD est égal à AC, comme côtés opposés d'un parallélogramme,

$$\frac{AB}{AC} = \frac{DH}{DG}.$$

Donc les forces AB et AC sont inversement proportionnelles à leurs bras de levier DG et DH, et par suite ces deux forces se font équilibre. On doit en conclure, d'après ce qu'on vient de dire, que la résultante de ces deux forces passe par le point D, c'est-à-dire qu'elle est dirigée suivant la diagonale AD.

Pour la démonstration précédente, la *fig*. 26 a été faite de manière que le point D fasse partie du corps M, auquel les forces AB et AC sont appliquées : mais il est clair que la direction de la résultante de ces forces ne dépend, en aucune manière, de la forme ni des dimensions du corps sur lequel elles agissent, et que, dans tous les cas, cette direction sera celle de la diagonale du parallélogramme formé sur les deux lignes droites qui représentent les composantes en grandeur et en direction.

§ 34. Passons à la seconde partie de la proposition énoncée au commencement du § 33, qui consiste en ce que la résultante des deux forces AB et AC est représentée en grandeur par la diagonale AD. Nous observerons d'abord que, quand on connaît les directions de deux forces appliquées à un point, la direction de leur résultante, et la grandeur de l'une des composantes, on peut, par ce qui précède, trouver la *grandeur de l'autre composante*. Soit ACB, *fig*. 27, une *corde dont une extrémité est fixée* au point A, et dont on tire

l'autre extrémité B; au point C de cette corde est suspendu un p
et la force de traction exercée au point B, pour maintenir ce p
en équilibre, est mesurée par un dynamomètre. On sait qu
tensions des cordons CA et CB ont une résultante dirigée sui

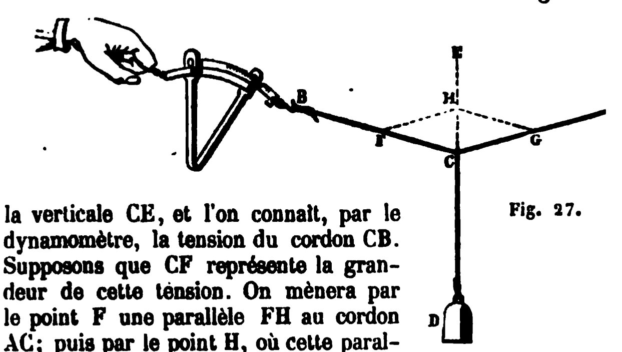


Fig. 27.

la verticale CE, et l'on connaît, par le dynamomètre, la tension du cordon CB. Supposons que CF représente la grandeur de cette tension. On mènera par le point F une parallèle FH au cordon AC; puis par le point H, où cette parallèle coupe la direction CE de la résultante, on mènera une p. lèle HG au cordon CB : la longueur CG représentera la gran de la tension du cordon AC. On voit, en effet, que si cette sion était représentée par une longueur plus grande ou plus p que CG, la résultante ne serait pas dirigée suivant la di nale du parallélogramme construit sur les lignes qui représe les composantes.

Lorsqu'un corps M, *fig*. 28, est soumis à l'a de deux forces AB, AC, ces deux forces ont résultante, qui est dirigée suivant la diagonale A parallélogramme ABDC, ainsi que nous l'avons montré. Si nous appliquons au corps, suivant une force égale et directement opposée à la r tante, elle fera équilibre à cette résultante, et par conséquent capable de faire aussi équili ses composantes : ainsi le corps M, soumis à l'a des forces AB, AC, et d'une force agissant su AF, et égale à la résultante que nous cherchon trouvera en équilibre. La force AC, faisant équ aux deux autres, mettrait également en équ leur résultante : donc la résultante de la force et de la force appliquée suivant AF, est dirigée vant la ligne AE, prolongement de AC. Ainsi *connaissons les directions* AB, AF de deux forces, la directio

Fig. 28.

de leur résultante, et la grandeur AB de l'une d'elles ; nous pouvons, comme nous l'avons fait voir il n'y a qu'un instant, déterminer la grandeur de la composante dirigée suivant AF. Pour cela, par le point B, nous mènerons BE parallèle à AF, puis, par le point E, nous menerons EF parallèle à AB. La longueur AF, ainsi obtenue, représentera la grandeur de la force dirigée suivant cette ligne, et aussi la grandeur de la résultante que nous cherchons, puisque cette force AF lui est égale et contraire. Mais ABEF étant un parallélogramme, AF est égal à BE ; de plus, à cause du parallélogramme ADBE, le côté BE est égal au côté AD : donc AD est égal à AF, et l'on peut en conclure que AD représente en grandeur la résultante des deux forces AB et AC.

Au moyen de ce que nous venons de démontrer, nous sommes en mesure d'énoncer la proposition suivante : *La résultante de deux forces appliquées à un point, suivant des directions différentes, est représentée en grandeur et en direction par la diagonale du parallélogramme construit sur les lignes droites qui représentent les composantes*. Cette proposition est habituellement désignée sous le nom de *parallélogramme des forces*.

§ 35. Il arrive souvent qu'une force étant donnée, on a besoin de la remplacer par deux autres forces agissant suivant des directions déterminées, et dont elle serait la résultante ; c'est ce que l'on appelle décomposer la force donnée en deux composantes, dont les directions sont connues. Cette décomposition se fera facilement, à l'aide du parallélogramme des forces. Soit AB, *fig.* 29, la ligne qui représente la force donnée, appliquée au point A, et qu'il s'agit de décomposer en deux autres forces agissant dans les directions AC et AD. Par le point B on mènera BE parallèle à AD, et BF parallèle à AC, et l'on obtiendra ainsi les lignes AE, AF, qui représenteront les grandeurs des composantes qu'on voulait trouver.

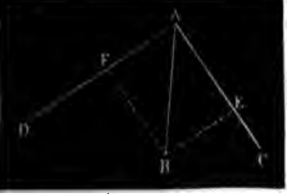


Fig. 29.

§ 36. Lorsqu'un corps sera soumis à l'action de plus de deux forces, appliquées à un même point, suivant des directions différentes, on trouvera la résultante de toutes ces forces de la manière suivante. On composera d'abord deux des forces données en une seule ; puis on composera la résultante partielle, ainsi obtenue, avec une troisième des forces données ; et l'on continuera ainsi jusqu'à ce que, par des compositions successives, on ait réduit toutes les forces données à une seule, qui sera leur résultante.

DU CENTRE DE GRAVITÉ D'UN CORPS.

§ 37. **Définition du centre de gravité.** — Un corps solide est formé par la réunion d'un grand nombre de molécules placées à côté les unes des autres dans des positions déterminées. Chacune de ces molécules est pesante ; elle est soumise à une force agissant verticalement et de haut en bas, que nous appelons son poids. Les poids des différentes molécules, dont l'ensemble constitue un corps solide, sont donc autant de forces appliquées au corps, aux différents points où sont placées ces molécules. A moins que le corps n'ait de très grandes dimensions, on peut regarder les verticales menées par ses différents points comme parallèles entre elles : toutes les forces dont on vient de parler sont donc parallèles, et ont en conséquence une résultante : c'est cette résultante que nous avons appelée le poids du corps.

Pour trouver la résultante des poids des diverses molécules d'un corps solide, on composera ces poids, conformément à ce qui a été expliqué au § 25, relativement à la composition d'un nombre quelconque de forces parallèles, agissant sur un corps solide, dans un même sens. Imaginons, pour simplifier, que le corps solide, dont nous nous occupons, ne contienne que quatre molécules A, B, C, D, *fig.* 30, dont nous supposerons les poids tous égaux à un milligramme. Les forces appliquées en A et B se composeront en une seule force, de deux milligrammes, appliquée au point E, milieu de la ligne AB. Cette première résultante partielle se composera, à son tour, avec la force appliquée en C, en une force unique, de trois milligrammes, appliquée en un point F ; ce point est situé sur la ligne CE, de telle manière que EF est la moitié de CF, ou, ce qui revient au même, le tiers de CE. Cette deuxième résultante partielle se composera enfin avec la force appliquée en D, ce qui donnera la résultante définitive de quatre milligrammes, appliquée au point G, situé sur la ligne FD, au quart de cette ligne à partir du point F.



Fig. 30.

Concevons maintenant qu'on retourne le corps composé des molécules A, B, C, D, pour le mettre dans une autre position, sans le déformer, c'est-à-dire sans que les molécules qui le constituent ces-

sent d'être placées de la même manière les unes par rapport aux autres. Le corps ayant été ainsi retourné, nous pourrons répéter la composition des poids des molécules, comme nous venons de l'effectuer dans la première position du corps; et si nous avons soin de composer ces poids dans le même ordre, ainsi que l'indique la *fig.* 31, il est clair que nous retrouverons successivement, pour les points d'application des résultantes partielles et de la résultante définitive, les mêmes points E, F, G, que nous avions trouvés précédemment.



Fig. 31.

Le résultat que nous venons d'obtenir, s'obtiendra évidemment de même, quel que soit le nombre des molécules d'un corps, et aussi quels que soient les poids de ces molécules, qui pourront être égaux ou inégaux. Ce n'est que pour fixer les idées, que nous avons réduit à quatre le nombre des molécules, et que nous les avons supposées également pesantes. Dans tous les cas, le point d'application de la résultante définitive des poids des diverses molécules ne dépendra aucunement de la position qu'on aura donnée au corps : ce point sera toujours placé de la même manière par rapport aux molécules.

Le point dont nous venons de reconnaître l'existence, par lequel passe constamment la résultante des poids des diverses molécules d'un corps, quelle que soit la position qu'on lui aura donnée, se nomme le *centre de gravité* de ce corps.

§ 38. **Détermination expérimentale du centre de gravité.** — Lorsqu'un corps est suspendu à une corde, par un point de sa surface, *fig.* 32, il prend une certaine position d'équilibre. La force qui tend à le faire tomber est son poids, et le point d'application de cette force est son centre de gravité. Si le corps ne tombe pas, c'est qu'il éprouve de la part de la corde une traction, dirigée de bas en haut, qui fait équilibre à la première force, et qui doit en conséquence lui être égale et directement opposée. On conclut de là que, si l'on imagine la direction de la corde prolongée à l'intérieur du corps, suivant la ligne AB, *cette ligne devra* passer par son centre de *gravité.*

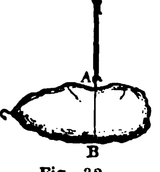


Fig. 32.

Si l'on vient maintenant à suspendre le corps par un autre point

de sa surface, il prendra une nouvelle position d'équilibre, *fig.* 33. Dans cette nouvelle position, la corde étant supposée prolongée à l'intérieur du corps, suivant CD, passera encore par le centre de gravité. Si l'on a conservé la trace de la première ligne AB, qui passait déjà par ce point, on voit qu'il ne pourra se trouver qu'au point de rencontre G de AB avec CD.

Fig. 33.

Le moyen qui vient d'être indiqué pour trouver le centre de gravité d'un corps peut paraître difficile à employer réellement, parce qu'il suppose qu'on ait tracé à l'intérieur du corps les deux lignes AB et CD. Mais s'il ne peut pas conduire à trouver ainsi exactement la position du centre de gravité, il fournira au moins, dans un grand nombre de cas, des indications suffisantes sur la place qu'occupe ce point à l'intérieur du corps Prenons pour exemple une canne de jonc, garnie à son extrémité supérieure d'une pomme d'ivoire. Cette canne est symétrique tout autour d'un axe qui la traverse dans toute sa longueur : il est clair que son centre de gravité est situé sur cet axe. Pour trouver où il est placé au juste, il suffira de suspendre la canne horizontalement, en l'attachant à une corde, ou bien en la posant sur l'arête vive d'un corps fixe, comme le montre la *fig.* 34 ; on cherchera, par le tâtonnement, en quel point la canne doit être appuyée, pour se maintenir horizontalement à l'aide de ce seul point d'appui, et l'on en conclura que son centre de gravité est situé au point de l'axe de figure qui se trouve immédiatement au-dessus du point d'appui.

Fig. 34.

§ 39. **Centre de gravité d'un corps homogène.** — Il arrive souvent que la matière dont un corps se compose est répandue uniformément dans toute l'étendue du volume qu'il occupe ; en sorte que, si l'on prend dans diverses parties du corps la quantité de matière contenue dans un millimètre cube, par exemple, on trouvera que le poids de cette matière sera toujours le même, quel que soit le point du corps où on l'aura prise. Dans ce cas, la position du centre de gravité ne dépend absolument que de la configuration du corps, et la recherche de ce point se réduit à une question de géométrie.

En géométrie, on appelle centre de figure d'une surface, un point tel qu'en menant une ligne droite, comme on voudra, par ce point, et la terminant de part et d'autre à la surface, elle se trouve divisée *par le point en deux* parties égales. Toutes les fois que la surface *d'un corps homogène* aura un centre de figure, il est bien évident

[redacted]

que ce point sera le centre de gravité du corps. C'est ainsi que le centre de gravité d'un parallélipipède, *fig.* 35, est au point de rencontre de deux des diagonales ; que le centre de gravité d'un cylindre droit, *fig.* 36, ou oblique, *fig.* 37, est au milieu de la ligne droit qui joint les centres des deux bases ; que le centre de gravité d'une sphère est au centre de cette sphère ; que le centre de gravité d'un

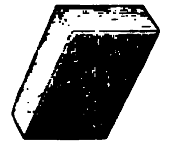


Fig. 35.



Fig. 36.

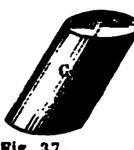


Fig. 37.

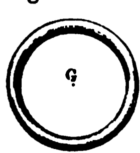


Fig. 38.

anneau, *fig.* 38, est au centre de cet anneau. On voit, par ce dernier exemple, que le centre de gravité d'un corps n'est pas nécessairement situé dans la portion de l'espace qui est occupée par la matière du corps.

§ 40. **Centre de gravité d'une surface.**—Quelquefois le corps dont on veut trouver le centre de gravité présente dans toute son étendue une même épaisseur, qui est petite par rapport à ses autres dimensions ; en sorte que l'on est naturellement porté à faire abstraction de cette épaisseur, et à assimiler le corps à une simple surface. C'est ce qui arrivera, par exemple, pour une planche mince, ou une feuille de tôle. Si, de plus, ce corps est homogène, la position de son centre de gravité ne dépendra que de la figure de la surface à laquelle on le suppose réduit. C'est ainsi qu'on est conduit à chercher le centre de gravité d'une surface.

On reconnaîtra facilement que le centre de gravité d'un parallélogramme, *fig.* 39, est au point de rencontre de ses diagonales. On verra de même que celui d'un cercle n'est autre chose que le centre du cercle.

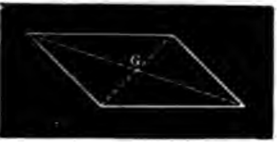


Fig. 39.

Pour trouver le centre de gravité d'un triangle, *fig.* 40, nous observerons que la ligne AD, qui joint le sommet A au milieu de la base BC, divise en deux parties égales toutes les lignes, telles que mn, menées parallèlement à la base. Imaginons que les molécules dont se compose notre triangle soient rangées régulièrement le long de ces lignes, et que le triangle soit posé sur l'arête vive d'un prisme PQ, *de manière à s'appuyer* sur cette arête par la ligne *AD. Chacune des files de molécules*, si elle était seule, se tiendrait

en équilibre sur l'arête du prisme, puisqu'elle est supportée par s milieu. Toutes les files étant supposées liées ensemble, de maniè à former le triangle, se maintie dront encore en équilibre, et triangle ne tendra pas à tomb plutôt d'un côté que de l'autr on en conclut nécessairement q le centre de gravité du triangle e situé sur la ligne AD. On verr de même qu'il est situé sur la lig qui joint le sommet B au mili E du côté AC : donc il se trou au point G de rencontre de ces de lignes. On démontre en géométrie que le point G, ainsi obten divise la ligne AD en deux parties, dont l'une, AG, est double l'autre, GD : on peut donc dire que le centre de gravité d'un tria gle est sur la ligne qui joint le sommet au milieu de la base, et tiers de cette ligne à partir de la base.

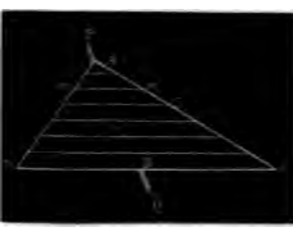


Fig. 40.

A l'aide du résultat que nous venons d'obtenir, nous résoudro sans peine la question suivante : Trois hommes doivent porter triangle pesant, *fig*. 41, en le prenant chacun par un des som mets ; quel est celui qui sera le pl chargé, et celui qui le sera le moins? poids du triangle, que nous supposero être de 45ᵏ, est une force appliquée son centre de gravité G. D'après ce q nous venons de voir, la ligne BG prolo gée va passer par le milieu D du cô AC, et la distance BG est le double de distance GD : nous pouvons donc regard la force verticale de 45ᵏ, appliquée point G, comme résultant de la composition d'une force vertic de 15ᵏ appliquée au point B, et d'une autre force verticale de 3 appliquée au point D. Mais cette dernière force, qui agit au mili de AC, peut être considérée comme provenant de la composition deux forces verticales, de chacune 15ᵏ, agissant l'une en A, l'au en C. Donc le poids du triangle équivaut à trois forces, de 15ᵏ ch cune, agissant verticalement aux trois sommets du triangle ; par suite, les trois hommes qui porteront le triangle seront éga ment chargés, quelle que soit sa forme.



Fig. 41.

§ 41. Centre de gravité d'un corps formé par la réunion plusieurs autres corps. — Lorsqu'on connaît les centres de gra

[redacted]

et les poids des diverses parties dont un corps est formé, il est facile de trouver le centre de gravité du corps tout entier. Prenons pour exemple deux boulets inégaux, homogènes, fixés l'un à l'autre par une tige cylindrique, également homogène, *fig.* 12. Supposons que le plus gros des deux boulets pèse 5^k, le plus petit 2^k, et la tige qui les réunit 1^k. Le centre de gravité du corps tout entier est le point d'application de la résultante des poids de ses diverses molécules.

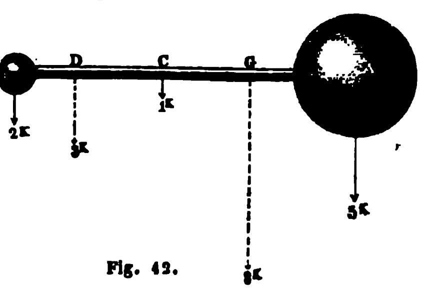


Fig. 12.

On peut d'abord composer entre eux les poids des molécules du gros boulet, ce qui donnera une force de 5^k, appliquée à son centre A ; on composera également entre eux les poids des molécules du petit boulet, et l'on trouvera une force résultante de 2^k, appliquée au point B, centre de ce petit boulet ; enfin la résultante des poids des molécules de la tige, qui réunit les deux boulets, est une force de 1^k, agissant au point C, milieu de l'axe de cette tige. Il ne reste plus qu'à composer ces trois forces parallèles de 5^k, 2^k et 1^k, appliquées respectivement aux points A, B, C, pour avoir la résultante définitive, dont le point d'application est le centre de gravité que nous voulons trouver. Pour cela on composera les forces de 2^k et 1^k, agissant en B et C, en une seule de 3^k, agissant au point D, qui est tel que DB est la moitié de DC ; ensuite on composera la force de 3^k appliquée au point D, avec celle de 5^k appliquée au point A, en une seule force de 8^k, qui agira sur un point G, tel que AG soit les $\frac{3}{8}$ de GD. G sera le centre de gravité du corps tout entier.

§ 12. **Équilibre d'un corps pesant qui repose sur un plan horizontal.** — Lorsqu'un corps pesant s'appuie sur un plan horizontal, sur une table ou sur le sol, par exemple, pour qu'il se maintienne dans cette position sans tomber ni d'un côté ni d'un autre, il doit remplir certaines conditions : la considération du centre de gravité va nous permettre de les trouver. Ce corps s'appuie sur le plan par des points A, B, C, D, E, F, G, *fig.* 13, dont le nombre est souvent très grand. On peut toujours former avec ces points un polygone convexe tel que ABDEG, c'est-à-dire un polygone qui n'ait *pas d'angles rentrants ; plusieurs* des points d'appui du corps *resteront ordinairement à l'intérieur* de ce polygone, comme les

points C, F, et ne concourront pas à sa formation. L'action de la pesanteur sur le corps se traduit, en définitive, par une force verticale égale à son poids et appliquée à son centre de gravité. Pour peu qu'on y réfléchisse, on verra que, si la direction de cette force passe à l'intérieur du polygone dont on vient de parler, le corps se maintiendra sur le plan, sans changer de position ; mais que, si elle passe en dehors de ce polygone, elle fera nécessairement basculer le corps, qui prendra ainsi une nouvelle position dans laquelle il puisse être en équilibre.

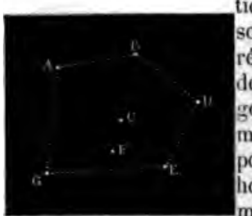
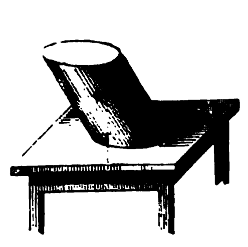
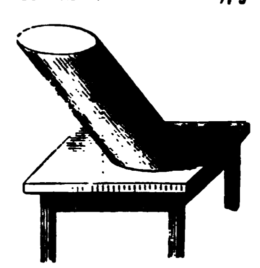


Fig. 43.

Un cylindre oblique, s'appuyant par sa base sur une table, *fig.* 44,


Fig. 44.


Fig. 45.

restera dans cette position, si la verticale qui passe par son centre de gravité vient rencontrer la table à l'intérieur du cercle de base, cercle qui remplace dans ce cas le polygone convexe dont on a parlé il n'y a qu'un instant. Mais si ce cylindre oblique a une plus grande longueur, il pourra arriver que la verticale passant par son centre de gravité tombe sur la table en dehors du cercle de base, *fig.* 45, et alors le cylindre ne restera pas dans cette position : il tombera nécessairement sur le côté.

Fig. 46.

Tout le monde connaît ces jouets d'enfant, qui sont formés d'un morceau de moelle de sureau, au bout duquel on a fixé un bouton métallique. Lorsqu'on les pose sur une table, en les couchant sur *le côté, fig.* 46, *ils* se redressent immédiatement pour se placer verticalement. Cela tient à ce que la moelle de sureau étant extrême-

ent légère, le centre de gravité d'un pareil corps est situé à l'intérieur du bouton métallique ; et que lorsque ce corps est couché ır le côté, la verticale qui passe par son centre de gravité est irigée en dehors du polygone convexe, formé par ses points d'appui avec la table. La force qui est appliquée au centre de gravité eut alors produire son effet, en abaissant ce point, ce qui oblige le orps à se redresser.

Pour qu'un homme qui se tient debout soit en équilibre, il faut ue la verticale qui passe par son centre de gravité soit dirigée à ntérieur du polygone convexe, qu'on peut former avec les points contact de ses pieds avec le sol. La *fig.* 47 montre la forme de ce olygone, dont toute la surface a été couverte de achures. Si l'on vient à charger cet homme d'un rdeau un peu lourd, il devra changer de posion, afin que le centre de gravité du corps total, rmé de son corps et du fardeau, satisfasse encore à la condition précédente : s'il porte ce fardeau sur son dos se penchera en avant ; s'il le tient suspendu à côté de lui à l'aide sa main droite, il se penchera à gauche. Si cet homme veut isir de la main, sans se déplacer, un objet un peu éloigné, il longera son bras et penchera son corps du côté de l'objet : mais n même temps il portera une jambe en arrière, pour maintenir oujours le centre de gravité dans les conditions qui conviennent à équilibre.

Fig. 47.

§ 13. **Pressions supportées par les points d'appui.** — Un orps pesant qui repose sur un plan horizontal exerce des pressions ur ce plan, en chacun de ses points d'appui. Ces pressions peuvent tre déterminées, ainsi que nous allons le voir, toutes les fois que e nombre des points d'appui ne surpasse pas trois.

Si le corps s'appuie sur le plan par un seul point, et qu'il soit en quilibre, il est clair que la pression qu'il exerce en ce seul point l'appui est égale à son poids.

Prenons pour exemple du cas où il y a deux points d'appui, le corps représenté par la *fig.* 48, qui se compose d'un disque circulaire, et d'une tige cylindrique fixée perpendiculairement à ce disque en son centre. Ce corps, posé sur le côté, s'appuiera en deux points A et B, et l'équilibre exige que la verticale, menée par *son centre de gravité G*, rencontre le plan en un point *C de la ligne droite AB. Le poids du corps* est une force appliquée sui-

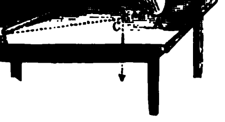


Fig. 48.

vant la verticale GC ; nous pouvons regarder cette force comme provenant de la composition de deux autres forces verticales, appliquées l'une en A, l'autre en B, forces que nous trouverons aisément. Il suffira, en effet, de diviser le poids du corps en deux parties, qui soient entre elles dans le rapport des deux distances AC et CB ; AC étant plus petit que CB, la plus grande des deux forces partielles ainsi obtenues sera la composante appliquée au point A, et l'autre sera la composante appliquée au point B. Ces deux composantes seront précisément les pressions que le corps exerce sur ses deux points d'appui.

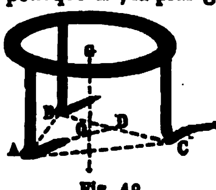


Fig. 49.

S'il s'agit d'un corps reposant sur un plan par trois points A, B, C, *fig.* 49, on trouvera encore, de la manière suivante, les pressions exercées sur les trois points d'appui. La verticale GO, passant par le centre de gravité G, rencontre le plan en un point O, qui doit être situé à l'intérieur du triangle ABC. Le poids du corps, qui est appliqué en G, peut être regardé comme agissant au point O, et comme provenant de la composition de deux forces verticales, appliquées, l'une en A, l'autre en D. Cette dernière force peut elle-même être décomposée en deux forces verticales, agissant, l'une en B, l'autre en C : en sorte qu'on aura trouvé ainsi trois forces verticales, dont les points d'application sont A, B, C, et qui ont pour résultante le poids du corps. Ces trois forces sont les pressions supportées par les points d'appui A, B, C.

Lorsqu'un corps pesant s'appuie sur un plan par plus de trois points, il n'est plus possible de déterminer les pressions qu'il exerce en ses points d'appui, par la seule connaissance de la position de son centre de gravité ; l'exemple suivant le fera bien comprendre. Une table, *fig.* 50, posée sur un parquet, s'y appuie par quatre points A, B, C, D. Imaginons que le parquet soit solide en A et D, tandis qu'en B et C il fléchisse sous la moindre pression ; il est bien clair que le poids de la table portera presque tout entier sur les points A et D, et que les points B et C ne supporteront qu'une pression très faible. Si, au contraire, le parquet était solide en B et C, et



Fig. 50.

[redacted]

flexible en A et D, la table exercerait en B et C des pressions beaucoup plus fortes qu'en A et D.

Tout ce qu'on peut dire, en général, pour le cas où un corps pesant repose sur un plan horizontal par plus de trois points, c'est que la somme des pressions exercées sur les points d'appui est égale au poids du corps : mais on ne peut, en aucune manière, assigner la valeur de chacune d'elles.

§ 44. Équilibre d'un corps pesant qui ne peut que tourner autour d'un axe horizontal. — Lorsqu'un corps solide ne peut se mouvoir qu'en tournant autour d'un axe horizontal, comme une roue hydraulique, ou une meule de rémouleur, la position de son centre de gravité joue un rôle important. Si ce point est situé exactement sur la ligne droite idéale autour de laquelle peut s'effectuer le mouvement de rotation, le corps restera en équilibre dans toutes les positions qu'on pourra lui donner autour de l'axe : l'action de la pesanteur ne tendra nullement à le faire tourner, pour le ramener dans une autre position d'équilibre. On voit, en effet, que cette action se réduisant en définitive à une force appliquée au centre de gravité, la direction de cette force, la seule qu'on suppose appliquée au corps, rencontrera toujours l'axe de rotation, et que cette force ne pourra, en conséquence, faire tourner le corps ni d'un côté ni de l'autre : elle sera détruite par la fixité de l'axe, et ne fera qu'appuyer le corps sur ses supports.

Si, au contraire, le centre de gravité n'est pas situé sur l'axe de rotation, le corps, soumis à la seule action de la pesanteur, ne pourra se maintenir en équilibre que dans deux positions différentes. Lorsqu'on le fait tourner, son centre de gravité décrit une circonférence de cercle, *fig.* 51, dont le centre est situé sur l'axe de rotation. Il pourra se maintenir en équilibre, dans chacune des positions pour lesquelles ce centre de gravité sera au point le plus bas A, ou au point le plus élevé B de cette circonférence : la direction de la force qui lui est appliquée rencontrant l'axe, cette force ne tendra pas plus à le faire tourner à droite qu'à gauche Mais toutes les fois que le centre de gravité sera ailleurs qu'en un de ces deux points, la force qui lui est appliquée tendra constamment à l'abaisser, en faisant tourner le corps, soit à droite, soit à gauche. On voit par là que le centre de gravité doit être en A ou en B, pour que le corps ne tende pas à tourner, sous la seule action de la pesanteur : et que l'équilibre sera *stable, si le centre de gravité* est en A, instable, s'il est en B.



Fig. 51.

Pour que l'action de la pesanteur ne gêne en rien le mouvement de rotation qu'on veut donner à un corps autour d'un axe horizontal, on doit donc faire en sorte que son centre de gravité soit situé exactement sur cet axe. C'est ce qu'on fait, par exemple, pour les aiguilles des horloges de grandes dimensions : l'aiguille présente souvent, au delà du centre du cadran, un prolongement court, mais pesant, qu'on a déterminé de manière que le centre de gravité de l'aiguille tout entière soit situé sur l'axe : souvent aussi, afin que l'aiguille ne s'étende pas des deux côtés du centre du cadran, on fixe à la tige qui lui sert d'axe, en arrière du cadran, un contre-poids destiné à produire le même effet. Dans les ateliers où l'on tourne de grosses pièces de fonte ou de fer, on adapte à ces pièces, lorsqu'elles sont montées sur le tour, des masses additionnelles qui ont encore pour objet de ramener le centre de gravité sur l'axe de rotation.

§ 45. L'influence du centre de gravité sur la position d'équilibre d'un corps, qui ne peut que tourner autour d'un axe horizontal, est rendue bien évidente par l'appareil suivant, qui a été désigné sous le nom d'*horloge magique*.

Un cadran de cristal transparent, *fig*. 52, est percé en son centre d'un trou, dans lequel peut tourner librement l'axe C d'une aiguille. Cette aiguille, terminée en pointe à l'une de ses extrémités, pour pouvoir indiquer l'heure vers laquelle elle est dirigée, porte à l'autre extrémité un anneau creux, à l'intérieur duquel peut circuler un petit corps assez pesant A. Un mouvement de montre, logé dans l'intérieur de l'aiguille, fait mouvoir uniformément ce corps A sur tout le contour de l'anneau, dans le sens indiqué par la flèche, et lui fait faire ainsi un tour entier en douze heures. Le déplacement de ce corps détermine un changement de position du centre de gravité de l'aiguille, laquelle tourne en conséquence, pour se mettre à chaque instant dans la direction qui convient à l'équilibre. Pour trouver le centre de gravité de l'aiguille, correspondant à une des positions du mobile A, il faut la regarder comme formée de deux parties, dont l'une est ce mobile, et l'autre tout le reste de l'aiguille. Cela posé, on imaginera qu'au centre de gravité B de cette deuxième partie, on ait appliqué une force verticale égale à son poids, et l'on composera cette force avec le poids du mobile A : on obtiendra ainsi, pour le centre de gravité de l'aiguille tout entière, un point G situé sur la ligne droite AB, et divisant cette ligne en deux segments, BG, AG,

Fig. 52.

inversement proportionnels aux poids des deux parties de l'aiguille. Pour toutes les autres positions que le petit mobile A occupera à l'intérieur de l'anneau, on trouvera de la même manière le centre de gravité de l'aiguille tout entière, et l'on reconnaîtra que ce centre de gravité décrit aussi, d'un mouvement uniforme, un petit cercle, qui est ponctué sur la *fig.* 52 ; c'est au centre de ce petit cercle qu'on a fixé l'axe C. A chaque instant la pesanteur dispose l'aiguille de manière à mettre son centre de gravité le plus bas possible. A mesure que ce centre de gravité décrit le petit cercle dont on vient de parler, l'aiguille doit donc tourner en sens contraire, et elle parcourt ainsi uniformément tout le tour du cadran en douze heures. Le mobile A, et le mouvement de montre qui le fait tourner dans l'anneau, étant cachés à l'intérieur de l'aiguille, il semble que cette aiguille marche seule ; et ce qui ajoute à l'illusion, c'est que l'aiguille est parfaitement libre de tourner sous l'impulsion du doigt, et que dès qu'on l'abandonne à elle-même, elle revient exactement dans la position qu'elle occupait, après avoir oscillé pendant quelques instants autour de cette position.

ÉTUDE DE DIVERSES MACHINES, SOUS LE POINT DE VUE DE L'ÉQUILIBRE DES FORCES QUI LEUR SONT APPLIQUÉES.

§ 46. **Pression d'un levier sur son point d'appui.** — Nous avons vu déjà, dans les §§ 28, 29 et 30, à quelle condition doivent satisfaire les forces qui sont appliquées à un levier, pour qu'il soit en équilibre : cherchons maintenant à déterminer la grandeur et la direction de la pression qu'il exerce sur son point d'appui.

Dans le cas du levier droit, représenté par la *fig.* 20 (page 21), les deux forces parallèles appliquées aux points A et B auront une résultante égale à leur somme, parallèle à chacune d'elles, et passant par le point C : cette résultante est la pression que le levier exerce sur son point d'appui C.

Pour le levier droit soumis à deux forces parallèles et de sens contraires, *fig.* 23 (page 23), on peut regarder la force appliquée au point B comme résultant de la composition de deux forces parallèles, appliquées, l'une au point A, l'autre au point C. La première serait égale et contraire à la force qui agit au point A du levier, et serait détruite par cette force : la seconde serait égale à la différence entre la force qui agit au point B et celle qui agit au point A : c'est cette seconde composante qui représente la pression exercée par le levier *sur son point d'appui*.

Si un levier, droit ou coudé, est soumis à l'action de deux forces

vant la verticale GC ; nous pouvons regarder cette force comme provenant de la composition de deux autres forces verticales, appliquées l'une en A, l'autre en B, forces que nous trouverons aisément. Il suffira, en effet, de diviser le poids du corps en deux parties, qui soient entre elles dans le rapport des deux distances AC et CB ; AC étant plus petit que CB, la plus grande des deux forces partielles ainsi obtenues sera la composante appliquée au point A, et l'autre sera la composante appliquée au point B. Ces deux composantes seront précisément les pressions que le corps exerce en ses deux points d'appui.

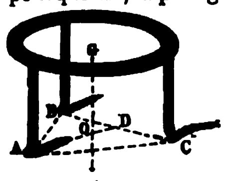


Fig. 49.

S'il s'agit d'un corps reposant sur un plan par trois points A, B, C, *fig.* 49, on trouvera encore, de la manière suivante, les pressions exercées sur les trois points d'appui. La verticale GO, passant par le centre de gravité G, rencontre le plan en un point O, qui doit être situé à l'intérieur du triangle ABC. Le poids du corps, qui est appliqué en G, peut être regardé comme agissant au point O, et comme provenant de la composition de deux forces verticales, appliquées, l'une en A, l'autre en D. Cette dernière force peut elle-même être décomposée en deux forces verticales, agissant, l'une en B, l'autre en C : en sorte qu'on aura trouvé ainsi trois forces verticales, dont les points d'application sont A, B, C, et qui ont pour résultante le poids du corps. Ces trois forces sont les pressions supportées par les points d'appui A, B, C.

Lorsqu'un corps pesant s'appuie sur un plan par plus de trois points, il n'est plus possible de déterminer les pressions qu'il exerce en ses points d'appui, par la seule connaissance de la position de son centre de gravité; l'exemple suivant le fera bien comprendre. Une table, *fig.* 50, posée sur un parquet, s'y appuie par quatre points A, B, C, D. Imaginons que le parquet soit solide en A et D, tandis qu'en B et C il fléchisse sous la moindre pression ; il est bien clair que le poids de la table portera presque tout entier sur les points A et D, et que les points B et C ne supporteront qu'une pression très faible. Si, au contraire, le parquet était solide en B et C, et

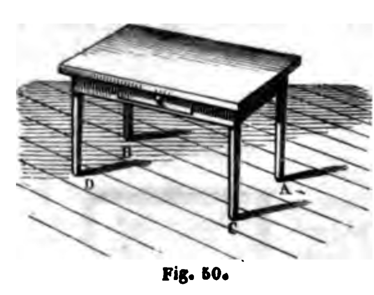


Fig. 50.

flexible en A et D, la table exercerait en B et C des pressions beaucoup plus fortes qu'en A et D.

Tout ce qu'on peut dire, en général, pour le cas où un corps pesant repose sur un plan horizontal par plus de trois points, c'est que la somme des pressions exercées sur les points d'appui est égale au poids du corps; mais on ne peut, en aucune manière, assigner la valeur de chacune d'elles.

§ 11. Équilibre d'un corps pesant qui ne peut que tourner autour d'un axe horizontal. — Lorsqu'un corps solide ne peut se mouvoir qu'en tournant autour d'un axe horizontal, comme une roue hydraulique, ou une meule de rémouleur, la position de son centre de gravité joue un rôle important. Si ce point est situé exactement sur la ligne droite idéale autour de laquelle peut s'effectuer le mouvement de rotation, le corps restera en équilibre dans toutes les positions qu'on pourra lui donner autour de l'axe : l'action de la pesanteur ne tendra nullement à le faire tourner, pour le ramener dans une autre position d'équilibre. On voit, en effet, que cette action se réduisant en définitive à une force appliquée au centre de gravité, la direction de cette force, la seule qu'on suppose appliquée au corps, rencontrera toujours l'axe de rotation, et que cette force ne pourra, en conséquence, faire tourner le corps ni d'un côté ni de l'autre : elle sera détruite par la fixité de l'axe, et ne fera qu'appuyer le corps sur ses supports.

Si, au contraire, le centre de gravité n'est pas situé sur l'axe de rotation, le corps, soumis à la seule action de la pesanteur, ne pourra se maintenir en équilibre que dans deux positions différentes. Lorsqu'on le fait tourner, son centre de gravité décrit une circonférence de cercle, *fig.* 51, dont le centre est situé sur l'axe de rotation. Il pourra se maintenir en équilibre, dans chacune des positions pour lesquelles ce centre de gravité sera au point le plus bas A, ou au point le plus élevé B de cette circonférence : la direction de la force qui lui est appliquée rencontrant l'axe, cette force ne tendra pas plus à le faire tourner à droite qu'à gauche. Mais toutes les fois que le centre de gravité sera ailleurs qu'en un de ces deux points, la force qui lui est appliquée tendra constamment à l'abaisser, en faisant tourner le corps, soit à droite, soit à gauche. On voit par là que le centre de gravité doit être en A ou en B, pour que le corps ne tende pas à tourner, *sous la seule action de la pesanteur*; et que l'*équilibre sera stable, si le centre de gravité est en* A, instable, s'il est en B.



Fig. 51.

Pour que l'action de la pesanteur ne gêne en rien le mouvement de rotation qu'on veut donner à un corps autour d'un axe horizontal, on doit donc faire en sorte que son centre de gravité soit situé exactement sur cet axe. C'est ce qu'on fait, par exemple, pour les aiguilles des horloges de grandes dimensions : l'aiguille présente souvent, au delà du centre du cadran, un prolongement court, mais pesant, qu'on a déterminé de manière que le centre de gravité de l'aiguille tout entière soit situé sur l'axe : souvent aussi, afin que l'aiguille ne s'étende pas des deux côtés du centre du cadran, on fixe à la tige qui lui sert d'axe, en arrière du cadran, un contre-poids destiné à produire le même effet. Dans les ateliers où l'on tourne de grosses pièces de fonte ou de fer, on adapte à ces pièces, lorsqu'elles sont montées sur le tour, des masses additionnelles qui ont encore pour objet de ramener le centre de gravité sur l'axe de rotation.

§ 45. L'influence du centre de gravité sur la position d'équilibre d'un corps, qui ne peut que tourner autour d'un axe horizontal, est rendue bien évidente par l'appareil suivant, qui a été désigné sous le nom d'*horloge magique*.

Un cadran de cristal transparent, *fig.* 32, est percé en son centre d'un trou, dans lequel peut tourner librement l'axe C d'une aiguille. Cette aiguille, terminée en pointe à l'une de ses extrémités, pour pouvoir indiquer l'heure vers laquelle elle est dirigée, porte à l'autre extrémité un anneau creux, à l'intérieur duquel peut circuler un petit corps assez pesant A. Un mouvement de montre, logé dans l'intérieur de l'aiguille, fait mouvoir uniformément ce corps A sur tout le contour de l'anneau, dans le sens indiqué par la flèche, et lui fait faire ainsi un tour entier en douze heures. Le déplacement de ce corps détermine un changement de position du centre de gravité de l'aiguille, laquelle tourne en conséquence, pour se mettre à chaque instant dans la direction qui convient à l'équilibre. Pour trouver le centre de gravité de l'aiguille, correspondant à une des positions du mobile A, il faut la regarder comme formée de deux parties, dont l'une est ce mobile, et l'autre tout le reste de l'aiguille. Cela posé, on imaginera qu'au centre de gravité B de cette deuxième partie, on ait appliqué une force verticale égale à son poids, et l'on composera cette force avec le poids du mobile A : on obtiendra ainsi, pour le centre de gravité de l'aiguille tout entière, un point G situé sur la ligne droite AB, et divisant cette ligne en deux segments, BG, AG,

Fig. 32.

[redacted]

inversement proportionnels aux poids des deux parties de l'aiguille. Pour toutes les autres positions que le petit mobile A occupera à l'intérieur de l'anneau, on trouvera de la même manière le centre de gravité de l'aiguille tout entière, et l'on reconnaîtra que ce centre de gravité décrit aussi, d'un mouvement uniforme, un petit cercle, qui est ponctué sur la *fig.* 52 : c'est au centre de ce petit cercle qu'on a fixé l'axe C. A chaque instant la pesanteur dispose l'aiguille de manière à mettre son centre de gravité le plus bas possible. A mesure que ce centre de gravité décrit le petit cercle dont on vient de parler, l'aiguille doit donc tourner en sens contraire, et elle parcourt ainsi uniformément tout le tour du cadran en douze heures. Le mobile A, et le mouvement de montre qui le fait tourner dans l'anneau, étant cachés à l'intérieur de l'aiguille, il semble que cette aiguille marche seule : et ce qui ajoute à l'illusion, c'est que l'aiguille est parfaitement libre de tourner sous l'impulsion du doigt, et que dès qu'on l'abandonne à elle-même, elle revient exactement dans la position qu'elle occupait, après avoir oscillé pendant quelques instants autour de cette position.

ÉTUDE DE DIVERSES MACHINES, SOUS LE POINT DE VUE DE L'ÉQUILIBRE DES FORCES QUI LEUR SONT APPLIQUÉES.

§ 46. **Pression d'un levier sur son point d'appui.** — Nous avons vu déjà, dans les §§ 28, 29 et 30, à quelle condition doivent satisfaire les forces qui sont appliquées à un levier, pour qu'il soit en équilibre : cherchons maintenant à déterminer la grandeur et la direction de la pression qu'il exerce sur son point d'appui.

Dans le cas du levier droit, représenté par la *fig.* 20 (page 21), les deux forces parallèles appliquées aux points A et B auront une résultante égale à leur somme, parallèle à chacune d'elles, et passant par le point C : cette résultante est la pression que le levier exerce sur son point d'appui C.

Pour le levier droit soumis à deux forces parallèles et de sens contraires, *fig.* 23 (page 23), on peut regarder la force appliquée au point B comme résultant de la composition de deux forces parallèles, appliquées, l'une au point A, l'autre au point C. La première serait égale et contraire à la force qui agit au point A du levier, et serait détruite par cette force ; la seconde serait égale à la différence entre la force qui agit au point B et celle qui agit au point A : c'est cette seconde composante *qui représente* la pression exercée par *le levier sur son point d'appui.*

Si un levier, droit ou coudé, est soumis à l'action de deux forces

qui ne sont pas parallèles, il ne pourra être en équilibre qu'autant que les directions de ces deux forces se rencontreront en un point D, *fig.* 53, et que leurs grandeurs satisferont à la condition énoncée précédemment (§ 29). Ces forces auront une résultante, qu'on obtiendra en construisant le parallélogramme DEGF, et qui sera nécessairement dirigé vers le point d'appui C du levier : car, sans cela, elle tendrait à faire tourner le levier autour de ce point, soit à droite, soit à gauche. Cette résultante, représentée par la diagonale DG, n'est autre chose que la pression que le levier exerce sur son point d'appui. On voit que, si l'on mène par le point C deux lignes CH et CK, respectivement égales et parallèles aux lignes qui représentent les forces appliquées aux points A et B, la diagonale CL du parallélogramme construit sur ces deux lignes aura la même grandeur et la même direction que la ligne DG : elle représentera donc, aussi bien que cette dernière ligne, la pression supportée par le point d'appui. C'est ordinairement ainsi, en construisant le parallélogramme CHKL, qu'on détermine la pression supportée par le point d'appui.



Fig. 53.

§ 47. **Balance.** — La balance est un instrument qui sert à peser les corps, c'est-à-dire à déterminer le nombre de grammes ou de kilogrammes qui représente le poids de chacun d'eux. Elle se compose essentiellement d'un levier, nommé *fléau*, dont le point d'appui est au milieu de sa longueur, et dont les extrémités supportent deux plateaux, *fig.* 54. Il est nécessaire que le fléau soit très mobile autour de son point d'appui, et que ce point reste toujours exactement au milieu de sa longueur, pendant qu'il oscille de part et d'autre de sa position d'équilibre. Pour cela, il est

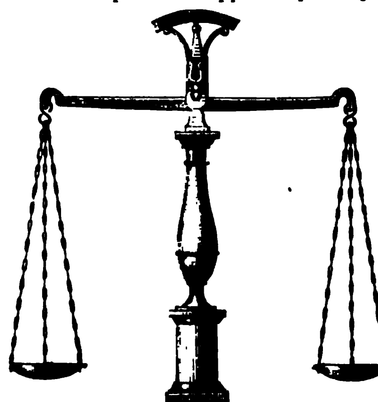


Fig. 54.

[redacted]

ın couteau d'acier, qui lui est fixé transversalement en son
et qui fait saillie des deux côtés : ce couteau présente une
iée, mais non tranchante, tournée vers le bas, et par laquelle
ıie sur deux petits plans d'acier, ou d'agate, disposés
ılement, l'un en avant du fléau, l'autre en arrière, et fixés
d solide. Les oscillations du fléau s'effectuent autour de
te, qui fait fonction d'axe de rotation.
eux extrémités du fléau présentent deux couteaux analogues
ui vient d'être décrit, mais disposés de manière à tourner
êtes vers le haut : c'est sur ces deux arêtes que viennent
r les crochets auxquels sont fixées les chaînes qui suppor-
plateaux.
sert de la balance en plaçant dans un des plateaux le corps
ut peser, et dans l'autre des poids marqués, en quantité
e pour établir l'équilibre, c'est-à-dire pour que le fléau se
ıne horizontal. Il suffit alors, si la balance est juste, de
le nombre de grammes ou de kilogrammes que représentent
marqués qu'on a employés, et l'on a ainsi le poids du corps.
'une balance soit juste, il faut qu'elle remplisse deux condi-
1° les distances du point d'appui du fléau aux points de sus-
des plateaux doivent être égales; 2° lorsque aucun corps
acé dans les plateaux, le fléau doit être horizontal. On voit
que, ces conditions étant remplies, si le fléau reste horizon-
squ'on aura mis deux corps dans les plateaux, les poids de
x corps devront être égaux : puisque ces poids sont deux
ui se font équilibre, en agissant sur le fléau, aux extrémités
bras de levier égaux.
e contente souvent, pour s'assurer de la justesse d'une
, de vérifier si la seconde des conditions précédentes est rem-
ais cela ne suffit pas La balance peut être très inexacte,
cette vérification ait réussi, parce qu'elle ne prouve en
manière l'égalité des bras de levier du fléau. Pour être cer-
la balance est juste, on opérera de la manière suivante :
voir reconnu que le fléau se maintient bien horizontalement,
les plateaux ne renferment aucun corps, on mettra dans ces
des poids tellement choisis que le fléau reste horizontal : on
a ensuite ces poids de place, en mettant dans le plateau de
le poids qui était dans le plateau de droite, et inversement, et
u ne cesse pas d'être horizontal, on sera sûr que la balance
te. Si les bras de levier du fléau étaient inégaux, les poids
mis dans les plateaux, et qui se faisaient équilibre en agissant
émités de ces bras de levier, devaient être aussi inégaux. le

plus grand agissant sur le petit bras de levier, et le plus petit sur le grand bras de levier. En changeant ces poids de place, on aurait ainsi appliqué le plus grand au grand bras de levier, le plus petit au petit bras de levier : ces poids n'auraient donc pas pu se faire équilibre, dans leur nouvelle position, et le fléau ne serait pas resté horizontal.

§ 48. **Sensibilité d'une balance.** — Pour qu'une balance puisse servir à déterminer très exactement le poids d'un corps, il ne suffit pas qu'elle soit juste, il faut encore qu'elle soit très sensible : c'est-à-dire que, lorsque le fléau se maintient horizontalement, sous l'action de deux poids égaux placés dans les plateaux, si l'on vient à ajouter, d'un côté seulement, un très petit poids, un milligramme, par exemple, le fléau doit se déplacer immédiatement pour prendre une nouvelle position d'équilibre, visiblement différente de celle qu'il occupait. En outre, une bonne balance doit présenter le même degré de sensibilité, quels que soient les poids des corps placés dans ses deux plateaux. Pour qu'il en soit ainsi, la balance doit satisfaire aux conditions suivantes : 1° le point d'appui du fléau et les points de suspension des plateaux doivent être en ligne droite : 2° le centre de gravité du fléau doit être au-dessous de son point d'appui, et très près de ce point.

On voit en effet que, quels que soient les poids égaux qu'on aura mis dans les deux plateaux, les poids de ces plateaux, ainsi chargés, seront deux forces égales appliquées aux deux points A et B de suspension, *fig.* 55 : ces deux forces auront une résultante passant par le point d'appui C du fléau, résultante qui sera détruite par la fixité de ce point, quelle que soit la direction de la ligne AB, horizontale ou oblique. Le fléau se trouvera donc dans les mêmes

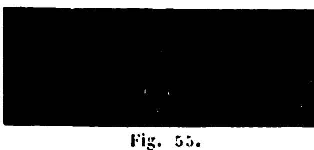


Fig. 55.

conditions que si les plateaux n'étaient pas suspendus à ses extrémités, et il ne prendra une position horizontale que sous l'action de son poids, appliqué à son centre de gravité G. Une différence d'un gramme, par exemple, entre les poids des corps mis dans les plateaux, produira donc le même effet que si le fléau était simplement soumis à une force d'un gramme, appliquée à une de ses extrémités A : sous l'action de cette force, il s'inclinera, et ne s'arrêtera dans une position A'B', que quand son poids, appliqué à son centre de gravité G', fera équilibre à la force qui l'a dérangé de sa première position. On comprend aisément par là qu'une même *différence entre les poids* des corps mis dans les deux plateaux pro-

[redacted]

ira toujours une même inclinaison du fléau, quels que soient ces ids: et que cette inclinaison sera d'autant plus marquée que le ntre de gravité G du fléau sera plus près de son point d'appui C.

Une balance qui remplit les conditions qu'on vient d'énoncer sera cependant d'être sensible, lorsqu'on chargera ses plateaux corps très pesants : parce que, d'une part, le fléau fléchira, et points A, B et C ne seront plus en ligne droite; et que, d'une re part, les arêtes des couteaux de suspension se déformeront, s la pression très grande qu'elles auront à supporter, ce qui dinuera beaucoup la mobilité du fléau.

En cherchant à atténuer autant que possible ces deux effets, on vient à obtenir des balances capables de peser, avec précision, corps dont les poids varient entre des limites très étendues. st ainsi que M. Deleuil a construit une balance qui est sensible ddition d'un milligramme dans un des plateaux, même lorsque plateaux contiennent des poids de 10^k chacun.

Lorsqu'une balance est très sensible, l'addition d'un très petit ls dans un des plateaux la dérange de sa position d'équilibre: s elle ne s'arrête à une autre position qu'après avoir effectué série d'oscillations, de part et d'autre de cette nouvelle position uilibre. Pour qu'on ne soit pas obligé d'attendre que les oscillas aient cessé, ce qui pourrait être long, on fixe au fléau une ille qui oscille en même temps que lui, et dont l'extrémité se it le long d'un arc de cercle divisé; lorsqu'on voit que l'aille, en oscillant, s'écarte également de chaque côté du point de arc de cercle qui correspond à l'horizontalité du fléau, on est que les poids mis dans les plateaux sont égaux, et l'on n'a pas oin d'attendre que le fléau soit immobile, pour reconnaître s'il horizontal.

§ 19. **Méthode des doubles pesées**. — Pour effectuer des ées très exactes, on emploie toujours une méthode due à Borda, onnue sous le nom de *méthode des doubles pesées*. Voici en quoi consiste.

Après avoir mis le corps à peser dans un des plateaux d'une bace, on lui fait équilibre, en mettant dans l'autre plateau de la naille de plomb ou du sable. L'équilibre étant bien établi, on en- e le corps, et on le remplace par des poids marqués, en quantité isante pour que le fléau reprenne la position horizontale, ou du ns pour qu'il oscille également de part et d'autre de cette posi- ı. Il est bien clair que ces poids marqués, produisant exactement même effet que le corps, dans les mêmes circonstances, doivent ir de *mesure à son poids*.

Dans l'emploi de cette méthode ingénieuse, on voit que l'exactitude du résultat ne dépend nullement de la justesse de la balance, mais seulement de sa sensibilité. Une mauvaise balance, pourvu qu'elle soit sensible, pourra ainsi servir à effectuer des pesées très délicates.

§ 50. **Balance de Quintenz.** — La balance de Quintenz, ainsi appelée du nom de son inventeur, est beaucoup employée dans le commerce, et pour peser les bagages, dans les bureaux des messageries ou des chemins de fer. Cette balance est aussi souvent désignée sous le nom de bascule. Elle est représentée par la *fig.* 56;

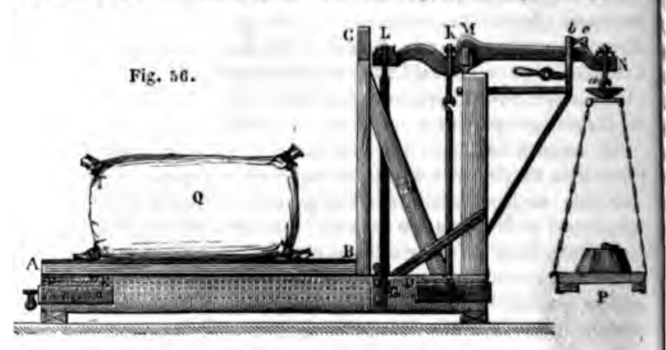


Fig. 56.

la *fig.* 57 est destinée à en montrer le mécanisme d'une manière plus claire.

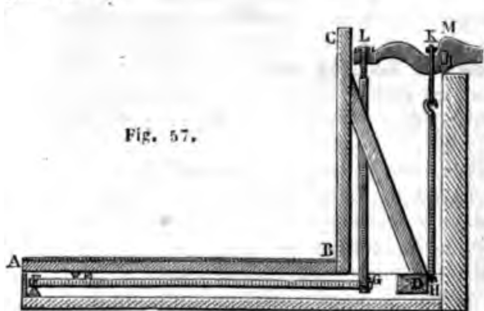


Fig. 57.

Un plateau AB, dont un des bords se relève en BC, est destiné à recevoir les corps qu'on veut peser. Ce plateau, qui fait corps avec la pièce D, s'appuie d'une part en E sur le levier FG, et d'une autre part, en H, il est accroché dans l'anneau qui termine inférieurement la tringle HK. Le levier FG, mobile autour du point F, s'appuie sur l'extrémité inférieure de la tringle GL. Les deux tringles HK et GL s'ap-

MN.

que, le plateau AB ne portant aucun corps, le levier
uilibre sous l'action de son propre poids, du poids du
des pressions exercées en K et L par les tiges qui s'y
ssions qui proviennent des poids de diverses parties
Si l'on place un corps Q sur le plateau AB, le poids
répartira entre les deux points d'appui E, H du pla-
on de ce poids qui agira au point H donnera lieu à une
appliquée en K au levier LN. L'autre portion de ce
it au point E du levier FG, exercera, par l'intermé-
vier, une pression cinq fois plus petite sur l'extrémité
le la tringle GL ; cette pression, qui se transmettra
de grandeur au point L du levier LN, produira sur ce
e effet qu'une pression cinq fois plus grande agissant
n sorte que ce sera exactement comme si la seconde
ds Q agissait directement sur le point K. Le levier LN
dans les mêmes conditions que si le poids du corps Q
tout entier en K; et, pour lui faire équilibre, il faudra
e plateau P un poids dix fois plus petit.

rvir de cette balance, on doit d'abord s'assurer, avant
cun corps sur le plateau AB, que le levier LN se tient
nt. On est ordinairement obligé pour cela de mettre
s dans le plateau P; ces poids forment ce que l'on
e : pour ne pas les confondre avec les nouveaux poids

tour de ce point. Au point A est disposé un crochet, quelquefois un plateau. Un anneau D, qui peut glisser le long de CB, supporte un

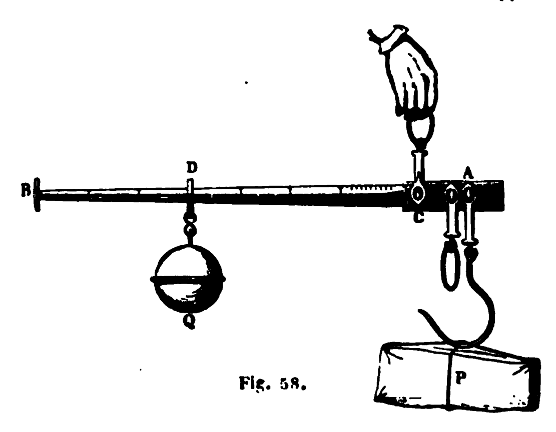


Fig. 58.

poids Q. Lorsqu'on a suspendu un corps P au crochet, on fait glisser l'anneau D, jusqu'à ce que le levier AB reste horizontal. La position de cet anneau, dépendant du poids du corps, peut servir à le déterminer : il suffit pour cela qu'on ait gradué d'avance la partie BC du levier, c'est-à-dire qu'on ait marqué les points où s'arrête l'anneau, lorsque le corps suspendu au crochet pèse 1^k, 2^k, 3^k, etc.

La balance romaine est souvent munie de deux anneaux de suspension, comme le montre la *fig.* 58; alors le crochet, qui doit supporter le corps à peser, peut tourner autour de l'extrémité du levier, de manière à se diriger toujours vers le bas, quel que soit celui des deux anneaux de suspension dont on se serve. Quand on veut peser des corps peu lourds, on suspend la balance par l'anneau le plus éloigné du point A, comme dans la *fig.* 58; mais, pour peser des corps dont le poids est un peu grand, on retourne l'instrument, pour le suspendre par l'autre anneau, afin de donner un plus petit bras de levier à ce poids.

§ 52. **Peson.**— Le peson est destiné, comme la balance romaine, à déterminer le poids d'un corps sans l'emploi d'aucun poids marqué. La *fig.* 59 représente un peson de petites dimensions, disposé spécialement pour peser les lettres, et qui est désigné pour cela sous le nom de *pèse-lettre*. Le levier coudé ACB peut tourner autour du point C. Le centre de gravité G de ce levier tend à venir se placer *sur la verticale qui passe* par le centre de rotation C : mais il en est

par l'action du poids d'un plateau E suspendu au point A. 'on charge ce plateau, le levier tourne, et l'extrémité B se ır un arc de cercle ; cet arc a dué d'avance, en sorte qu'on ur chaque position du point est le poids du corps qui a été r le plateau. Le renflement D, te le levier coudé, a pour objlacer le centre de gravité à ance suffisamment grande du e rotation.

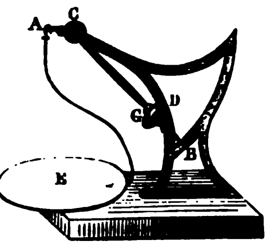


Fig. 59.

Poulie. — La poulie est un ·irculaire, qui présente sur sa dans tout son contour, une rainure qu'on nomme sa *gorge*, eut tourner librement autour d'un axe qui le traverse en ɔu. L'axe peut être fixé à la poulie, et alors ses deux extréurnent dans deux ouvertures circulaires pratiquées dans pe qui embrasse la poulie ; ou bien l'axe est fixé à la chape, ·erse une ouverture circulaire percée au centre de la poulie, ainsi tourner indépendamment de cet axe. Une corde s'enns la gorge de la poulie, s'applique sur une portion de son et s'en détache ensuite de part et d'autre, suivant les dide deux tangentes à sa circonférence.

f. 60 représente une poulie dont la chape est attachée à un e ; la corde qui passe dans sa gorge ; un poids à une de ses extrémités, utre extrémité est appliquée une e traction qui doit maintenir ce n équilibre. Les deux forces, qui , suivant les deux parties rectili- ; la corde, sont dans les mêmes ns que si elles agissaient aux deux :és d'un levier coudé formé des qui joignent le centre de la poulie its de contact A et B des deux corec sa circonférence : et comme les as de ce levier sont égaux, il s'ensuit que la force de trac- t être égale au poids du corps qu'elle maintient en équi-

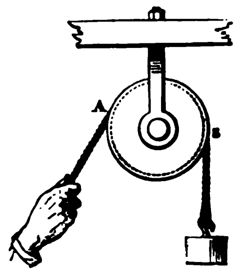


Fig. 60.

ulie peut être encore employée comme l'indiquent les *fig*. 61 ı chape *est alors munie d'un crochet* auquel on peut suspendre . *Une des extrémités de la corde* est fixée à un point F, et

à l'autre extrémité est appliquée une force de traction. L'é étant établi, les deux cordons qui se détachent de la poulie,

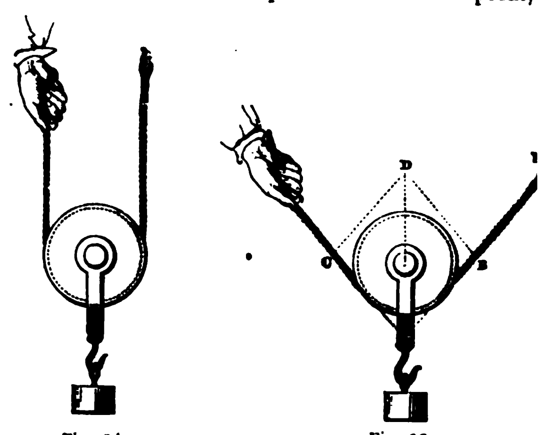


Fig. 61. Fig. 62.

et d'autre, doivent être également tendus, et la résultante d tensions doit être égale au poids du corps que la poulie su Dans le cas de la *fig*. 61, la force de traction sera donc la m ce poids. Dans le cas de la *fig*. 62, on prolongera les deux c jusqu'à leur rencontre en A ; on mènera par ce point une ve sur laquelle on prendra une longueur AD représentant le poi la poulie est chargée; enfin on mènera DB, DC parallèles au cordons : les lignes AB, AC ainsi obtenues représenteront le sions des deux cordons, et la force de traction sera égale d'elles. Les tensions des cordons étant égales, il en résulte lignes AB, AC devront avoir la même longueur, et par su les deux cordons devront être également inclinés sur la vertic

§ 54. **Moufles.** — Les moufles sont des machines formées réunion de plusieurs poulies sur une même chape. La *fig*. 63 sente un système de moufles dont chacune est formée d poulies tournant autour d'un même axe : chaque poulie d'ailleurs indépendamment des autres. La chape de la moufle rieure est fixée à l'aide du crochet qui la termine. Une cord tache par une de ses extrémités à cette chape; de là elle d et passe dans la gorge d'une des poulies inférieures; pu remonte, et passe dans la gorge d'une des poulies supérieure redescend ensuite, pour passer dans la gorge d'une seconde

ıre, et ainsi de suite, jusqu'à ce que, ayant embrassé les des diverses poulies, elle se détache de la dernière poulie su-re. A la seconde extrémité de 'orde est appliquée une force de ɪn, destinée à mettre en équilibre ds du corps que l'on suspend au et de la moufle inférieure.

l'on suit la corde dans toute sa ɪeur, on verra qu'elle a partout la e tension, puisque les cordons qui étachent d'une poulie sont toujours ement tendus. D'ailleurs six cor-s, qu'on peut regarder comme pa-èles, soutiennent la moufle infé-ure : la tension de chacun d'eux sera ne la sixième partie du poids du rps qui est suspendu à cette moufle. ı force de traction qui est appliquée l'extrémité libre de la corde, et qui étermine cette tension, aura donc la nême valeur, c'est-à-dire qu'elle sera six fois plus petite que le poids auquel elle fait équilibre.

A l'aide des moufles, comme à l'aide du levier, on peut, avec une force don-née, faire équilibre à une résistance aussi grande qu'on voudra. Il suffira pour cela de réunir dans chaque mou-fle un assez grand nombre de poulies ; car on voit que, pour avoir la grandeur de la force capable de vaincre une ré-sistance, il faut diviser cette résistance par le nombre total des poulies em-ployées.

Fig. 63.

§ 53. **Tour, ou Treuil**.—Lorsqu'on veut élever un corps pesant à une cer-taine hauteur, on se sert souvent de la machine désignée sous le nom de *tour*, ou *treuil*. Elle consiste en un cy-lindre A, *fig*. 64, quelquefois de fonte, mais plus ordinairement de bois, qui est terminé à ses deux extré-*mités par deux tourillons B, reposant* dans des coussinets fixe-

Le cylindre, qui n'est appuyé que par ses tourillons, peut tourner autour de son axe. Une corde, dont un bout est fixé sur le contour du cylindre, est attachée par son autre bout au corps P, qu'il s'agit d'élever. On fait tourner le cylindre, en agissant aux extrémités de leviers qui lui sont fixés ou bien qu'on introduit successivement dans des trous pratiqués sur son contour; la corde s'enroule, et elle fait monter le corps auquel elle est attachée.



Fig. 64.

Pour trouver la relation qui existe entre le poids du corps qui monte et la force qui le fait monter, nous observerons qu'il importe peu que le levier sur lequel agit la force soit implanté en tel point ou en tel autre point de la surface du tour; pourvu que ce levier conserve la même longueur, et que la force lui soit appliquée au même point, et perpendiculairement à sa longueur, cette force devra toujours avoir la même intensité pour soulever le poids. Nous pourrons donc admettre, pour simplifier, que la corde qui supporte le poids, et le levier sur lequel agit la force, soient situés dans un même plan perpendiculaire à l'axe du tour. Dès lors les deux forces P et F, *fig.* 65, se trouvent évidemment dans les mêmes conditions que si elles étaient appliquées aux deux extrémités du levier coudé MON : c'est-à-dire que, pour qu'il y ait équilibre, elles doivent être dans le rapport inverse du rayon OM du tour, et de la longueur ON du levier. Si, par exemple, ON est égal à cinq fois OM, la force F devra être la cinquième partie du poids P.



Fig. 65.

§ 56. **Cabestan.** — Le cabestan est un tour, dont l'axe est placé verticalement, *fig.* 66, et qui est employé, surtout dans les ports de mer, pour exercer de très grands efforts dans une direction horizontale ou presque horizontale. Le tourillon supérieur se prolonge au-dessus du coussinet dans lequel il tourne, et c'est à ce prolongement que sont adaptés quatre, six, ou même huit leviers, disposés réguliè-

[redacted]

rement sur son contour. La charpente qui porte les deux coussinets, et qui est simplement posée sur le sol, doit rester immobile pendant la manœuvre du cabestan : à cet effet elle est reliée par des cordes à des piquets solidement enfoncés en terre. Comme le tour est ordinairement très peu élevé, et que le câble sur lequel on doit exercer une force de traction est souvent très long, il serait difficile d'opérer, comme on l'a dit dans le paragraphe précédent, en enroulant le câble de plus en plus sur la surface du tour : aussi agit-on autrement. On fait faire au câble deux ou trois fois le tour du cylindre, puis on en remet l'extrémité libre entre les mains d'un homme, *fig.* 66, qui la tire avec une force suffisante pour empêcher le câble de glisser. De cette manière, lorsque des hommes agissent sur les extrémités des leviers, pour faire tourner le cabestan, le câble est entraîné par simple adhérence, et tandis qu'il s'enroule d'un côté, il se déroule de l'autre : il n'y a donc jamais que la même quantité de câble qui soit enroulée. Pour faciliter l'adhérence du câble sur la surface du tour, et présenter un plus grand obstacle à ce qu'il puisse glisser, on pratique souvent des cannelures longitudinales sur cette surface.

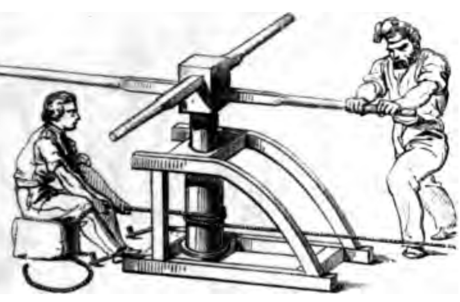


Fig. 66.

Quant à la relation qui existe entre la résistance vaincue et la force appliquée à l'extrémité d'un des leviers, pour vaincre cette résistance, on la trouvera de même que lorsqu'il s'agissait d'un tour à axe horizontal. On observera seulement que la force de traction exercée par l'homme qui tient la partie du câble qui se déroule fait équilibre à une portion égale de la résistance totale à vaincre ; l'excédant de cette résistance sera mis en équilibre par une force 8, 10 ou 12 fois plus petite, agissant à l'extrémité d'un des leviers, si ce levier est 8, 10 ou 12 fois plus long que le rayon du tour. Si, au lieu d'un seul homme agissant sur un des leviers, il y en a plusieurs qui poussent autant de leviers, ils n'auront à eux tous à exercer que la même pression totale ; c'est-à-dire que la somme des forces qu'ils *appliqueront aux différents* leviers sera égale à la force que *devrait appliquer un seul homme* pour vaincre la même résistance.

à l'autre extrémité est appliquée une force de traction. L'é
étant établi, les deux cordons qui se détachent de la poulie,

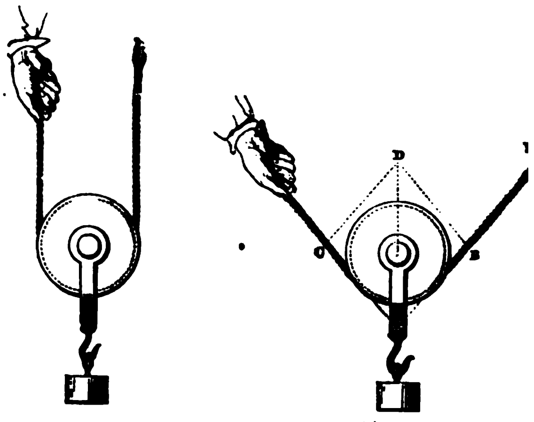


Fig. 61. Fig. 62.

et d'autre, doivent être également tendus, et la résultante d
tensions doit être égale au poids du corps que la poulie su
Dans le cas de la *fig.* 61, la force de traction sera donc la m
ce poids. Dans le cas de la *fig.* 62, on prolongera les deux c
jusqu'à leur rencontre en A; on mènera par ce point une ve
sur laquelle on prendra une longueur AD représentant le poi
la poulie est chargée; enfin on mènera DB, DC parallèles au
cordons : les lignes AB, AC ainsi obtenues représenteront le
sions des deux cordons, et la force de traction sera égale
d'elles. Les tensions des cordons étant égales, il en résulte
lignes AB, AC devront avoir la même longueur, et par su
les deux cordons devront être également inclinés sur la vertic

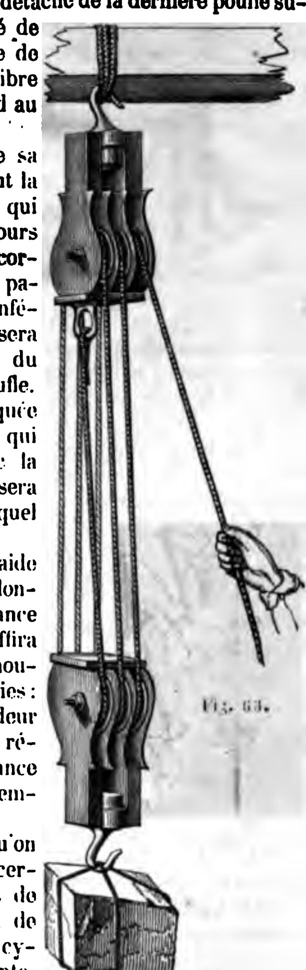
§ 54. **Moufles.** — Les moufles sont des machines formée
réunion de plusieurs poulies sur une même chape. La *fig.* 63
sente un système de moufles dont chacune est formée d
poulies tournant autour d'un même axe : chaque poulie
d'ailleurs indépendamment des autres. La chape de la moufle
rieure est fixée à l'aide du crochet qui la termine. Une cord
tache par une de ses extrémités à cette chape; de là elle d
et passe dans la gorge d'une des poulies inférieures; pu
remonte, et passe dans la gorge d'une des poulies supérieure
redescend ensuite, pour passer dans la gorge d'une seconde

[redacted]

ainsi de suite, jusqu'à ce que, ayant embrassé les
erses poulies, elle se détache de la dernière poulie su-
a seconde extrémité de
appliquée une force de
iée à mettre en équilibre
ps que l'on suspend au
moufle inférieure.

la corde dans toute sa
erra qu'elle a partout la
puisque les cordons qui
une poulie sont toujours
lus. D'ailleurs six cor-
ut regarder comme pa-
nnent la moufle infé-
on de chacun d'eux sera
ne partie du poids du
uspendu à cette moufle.
ction qui est appliquée
bre de la corde, et qui
e tension, aura donc la
c'est-à-dire qu'elle sera
tite que le poids auquel
re.

moufles, comme à l'aide
ut, avec une force don-
ilibre à une résistance
qu'on voudra. Il suffira
unir dans chaque mou-
and nombre de poulies :
, pour avoir la grandeur
able de vaincre une ré-
t diviser cette résistance
e total des poulies em-


Fig. 63.

ou Treuil.—Lorsqu'on
corps pesant à une cer-
on se sert souvent de
signée sous le nom de
Elle consiste en un cy-
, quelquefois de fonte,
airement de bois, qui est terminé à ses deux extré-
tourillons B, reposant dans des coussinets fixes C..

Le cylindre, qui n'est appuyé que par ses tourillons, peut tourner autour de son axe. Une corde, dont un bout est fixé sur le contour du cylindre, est attachée par son autre bout au corps P, qu'il s'agit d'élever On fait tourner le cylindre, en agissant aux extrémités de leviers qui lui sont fixés ou bien qu'on introduit successivement dans des trous pratiqués sur son contour; la corde s'enroule, et elle fait monter le corps auquel elle est attachée.



Fig. 64.

Pour trouver la relation qui existe entre le poids du corps qui monte et la force qui le fait monter, nous observerons qu'il importe peu que le levier sur lequel agit la force soit implanté en tel point ou en tel autre point de la surface du tour; pourvu que ce levier conserve la même longueur, et que la force lui soit appliquée au même point, et perpendiculairement à sa longueur, cette force devra toujours avoir la même intensité pour soulever le poids. Nous pourrons donc admettre, pour simplifier, que la corde qui supporte le poids, et le levier sur lequel agit la force, soient situés dans un même plan perpendiculaire à l'axe du tour. Dès lors les deux forces P et F, *fig.* 65, se trouvent évidemment dans les mêmes conditions que si elles étaient appliquées aux deux extrémités du levier coudé MON : c'est-à-dire que, pour qu'il y ait équilibre, elles doivent être dans le rapport inverse du rayon OM du tour, et de la longueur ON du levier. Si, par exemple, ON est égal à cinq fois OM, la force F devra être la cinquième partie du poids P.



Fig. 65.

§ 56. **Cabestan.** — Le cabestan est un tour, dont l'axe est placé verticalement, *fig.* 66, et qui est employé, surtout dans les ports de mer, pour exercer de très grands efforts dans une direction horizontale ou presque horizontale. Le tourillon supérieur se prolonge au-dessus du coussinet dans lequel il tourne, et c'est à ce prolongement que sont adaptés quatre, six, ou même huit leviers, disposés régulie-

rement sur son contour. La charpente qui porte les deux coussinets, et qui est simplement posée sur le sol, doit rester immobile pendant la manœuvre du cabestan : à cet effet elle est reliée par des cordes à des piquets solidement enfoncés en terre. Comme le tour est ordinairement très peu élevé, et que le câble sur lequel on doit exercer une force de traction est souvent très long, il serait difficile d'opérer, comme on l'a dit

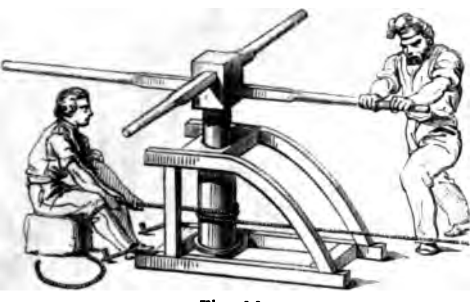


Fig. 66.

dans le paragraphe précédent, en enroulant le câble de plus en plus sur la surface du tour : aussi agit-on autrement. On fait faire au câble deux ou trois fois le tour du cylindre, puis on en remet l'extrémité libre entre les mains d'un homme, *fig.* 66, qui la tire avec une force suffisante pour empêcher le câble de glisser. De cette manière, lorsque des hommes agissent sur les extrémités des leviers, pour faire tourner le cabestan, le câble est entraîné par simple adhérence, et tandis qu'il s'enroule d'un côté, il se déroule de l'autre : il n'y a donc jamais que la même quantité de câble qui soit enroulée. Pour faciliter l'adhérence du câble sur la surface du tour, et présenter un plus grand obstacle à ce qu'il puisse glisser, on pratique souvent des cannelures longitudinales sur cette surface.

Quant à la relation qui existe entre la résistance vaincue et la force appliquée à l'extrémité d'un des leviers, pour vaincre cette résistance, on la trouvera de même que lorsqu'il s'agissait d'un tour à axe horizontal. On observera seulement que la force de traction exercée par l'homme qui tient la partie du câble qui se déroule fait équilibre à une portion égale de la résistance totale à vaincre ; l'excédant de cette résistance sera mis en équilibre par une force 8, 10 ou 12 fois plus petite, agissant à l'extrémité d'un des leviers, si ce levier est 8, 10 ou 12 fois plus long que le rayon du tour. Si, au lieu d'un seul homme agissant sur un des leviers, il y en a plusieurs qui poussent autant de leviers, ils n'auront à eux tous à exercer que la même pression totale ; c'est-à-dire que la somme des forces qu'ils appliqueront aux différents leviers sera égale à la force que devrait appliquer un seul homme pour vaincre la même résistance.

§ 57. **Roue à chevilles.** — Pour extraire des pierres de carrières souterraines qui communiquent par des puits verticaux avec la surface du sol, on emploie fréquemment des treuils, sur lesquels on



Fig. 67.

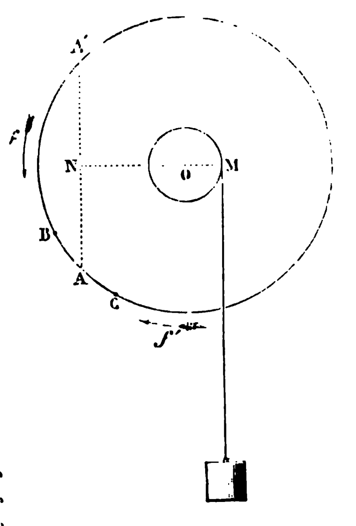
agit à l'aide de grandes roues à chevilles, au lieu de leviers, *fig.* 67. *On voit un grand* nombre de ces roues aux environs de Paris.

Pour manœuvrer cette machine, plusieurs ouvriers montent sur

[redacted]

les chevilles, comme sur une échelle ; le poids de leur corps force la roue à tourner ; la pierre monte, et lorsqu'elle est arrivée au-dessus de l'orifice du puits, un ouvrier recouvre cet orifice de forts madriers sur lesquels on la laisse redescendre.

Entrons dans quelques détails sur l'action des forces dans cette machine. Lorsqu'un homme exerce une pression ou une traction pour vaincre une résistance, il développe une force plus ou moins grande, suivant la grandeur de cette résistance. Ici il n'en est pas de même : la force provenant de l'action d'un homme sur la roue est le poids de son corps, et il n'est pas libre de faire varier cette force à volonté : mais il peut faire varier le bras de levier sur lequel elle agit, et c'est ainsi qu'il parvient à faire équilibre au poids qu'il veut soulever. Admettons, pour simplifier, qu'un seul ouvrier monte sur les chevilles de la roue, et que son poids suffise pour élever la pierre suspendue au câble. On voit que, lorsque l'ouvrier est au point A, *fig.* 68, son poids doit être regardé comme agissant sur le bras de levier ON ; en sorte que ce bras de levier augmente, si l'ouvrier s'élève de A en B On conçoit donc qu'il puisse se placer sur la roue, de manière à faire équilibre au poids de la pierre : il faudra pour cela que son poids et le poids de la pierre soient inversement proportionnels aux bras de levier ON et OM. Soit A la position que doit occuper l'ouvrier, pour que l'équilibre ait lieu. S'il monte en B, le bras de levier sur lequel il agit augmente ; son poids, qui n'a pas diminué, se trouve trop fort pour faire encore équilibre à la résistance : une portion seulement de son poids est employée à produire cet équilibre, et l'autre portion détermine le mouvement de la roue dans le sens de la flèche *f*. L'ouvrier se trouve donc ramené en A ; s'il continue à monter, la roue ne cessera pas de tourner, et la pierre sera ainsi élevée jusqu'au-dessus du puits.



Si l'ouvrier, au lieu de monter, descendait de A en C, le bras du

levier sur lequel il agirait diminuerait de longueur, son poids ne serait plus assez fort pour faire équilibre à la pierre, et la roue prendrait un mouvement contraire, dans le sens de la flèche f', ce qui le ramènerait encore en A. On voit donc que le point A est une position d'équilibre stable pour l'ouvrier, puisque s'il s'en éloigne, soit en montant, soit en descendant, la roue prend toujours un mouvement en vertu duquel il est ramené en ce point A.

Si l'ouvrier se place en A', son poids fera aussi bien équilibre au poids de la pierre que lorsqu'il est en A, puisque son bras de levier sera la même ligne ON. Mais l'équilibre sera instable : que l'ouvrier monte ou descende sur la roue, à partir du point A', la roue prendra un mouvement qui l'en éloignera de plus en plus. La stabilité de l'équilibre qui a lieu, lorsque l'ouvrier est au point A, est d'une très grande importance, en ce qu'elle prévient les accidents graves qui se produiraient si la roue était entraînée par le poids de la pierre, et emportait l'ouvrier dans son mouvement; aussi, pour conserver les avantages de cette stabilité, doit-on faire en sorte que le point A soit notablement plus bas que l'axe du treuil, car elle pourrait devenir inefficace, si ce point n'était que très peu inférieur à l'axe.

§ 58. **Courroie sans fin.** — Lorsqu'on veut transmettre le mouvement de rotation d'un arbre à un autre arbre parallèle au premier, et qui n'en est pas très rapproché, on emploie souvent une courroie sans fin, qui embrasse deux tambours, dont chacun est fixé à un des arbres. Ce mode de transmission de mouvement est employé surtout dans les ateliers où plusieurs machines, disposées pour effectuer diverses espèces de travaux, reçoivent le mouvement d'une même machine motrice, d'une roue hydraulique par exemple, ou d'une machine à vapeur. La machine motrice fait tourner un ou plusieurs arbres qui s'étendent dans toute la longueur des ateliers : et c'est sur ces arbres que sont placées, de distance en distance, les courroies qui doivent faire mouvoir les diverses machines-outils destinées, soit à travailler les métaux, soit à préparer et filer le coton, soit à scier le bois, etc. La *fig.* 69 montre une transmission de ce genre : la courroie, entraînée par le mouvement de rotation de l'arbre AB, fait tourner une meule à aiguiser Si l'on veut arrêter le mouvement de la meule, il suffit de pousser vers la gauche l'extrémité C du levier CDE, mobile autour du point D: la fourchette qui termine le levier en E, et dans laquelle passe la courroie, est alors portée vers la droite; et la courroie, entraînée latéralement par cette fourchette, vient s'enrouler sur un second tambour *placé à côté de celui* sur lequel elle était appliquée. Ce second

on désigne souvent sous le nom de *poulie folle*, n'est
ırbre qui le traverse, et peut, au contraire, tourner
cet
ur-
one
ans
ar-
ou-
la
ète.
ou-
la
ve-
ura
'ers
ré-
vier
ur-
era
tait
bli-
e à

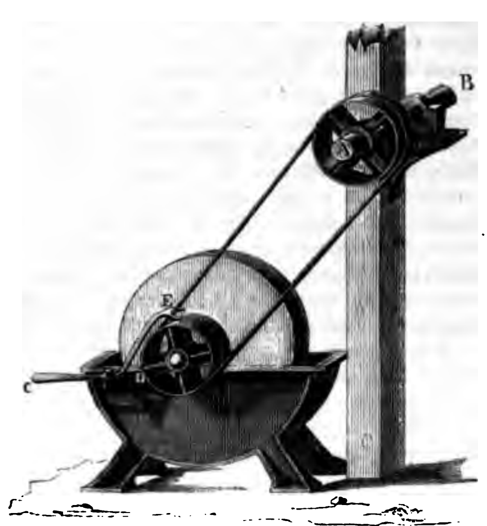


Fig. 69.

ous
e de la manière dont les forces agissent, par l'intermé-
ırroies sans fin, nous imaginerons qu'on veuille faire
oids P,
ıé à une
'enroule
A. Pour
sur la
qui fait
ambour
ıvement
se com-
treuil,
ie MN.
loit être
toute sa

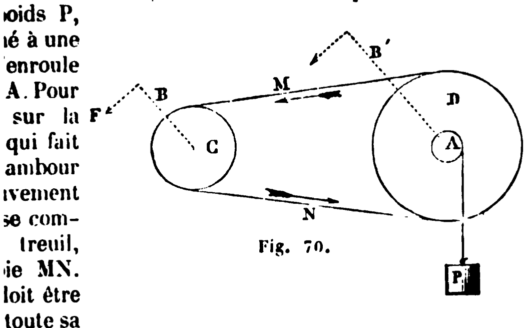


Fig. 70.

n qu'il se produise, entre sa face intérieure et les sur-
bours, *une adhérence qui* l'empêche de glisser sur ces
is la tension n'est pas la même partout. Pour que le

poids P soit soulevé, il faut que le brin M, qu'on nomme le brin moteur, soit plus tendu que le brin N : l'excès de la première tension sur la seconde est une force qui agit tangentiellement au tambour D, et qui fait équilibre au poids P. D'une autre part, ce même excès de tension est une résistance, appliquée tangentiellement au tambour C, et qui doit être vaincue par la force F, appliquée à la manivelle. Si le bras de la manivelle est double du rayon du tambour C, la différence des tensions des brins M et N sera double de la force F ; cette différence de tensions, agissant sur le tambour D, produira donc le même effet qu'une force égale à F agissant sur une manivelle B', dont le bras serait double du rayon du tambour D. Ainsi, que la force F agisse sur la manivelle B, pour faire tourner le treuil par l'intermédiaire de la courroie, ou bien qu'elle agisse sur la manivelle B', de manière à le faire tourner directement, elle sera capable de vaincre exactement le même poids P.

Remarquons maintenant que les longueurs des bras des manivelles B et B' sont dans le même rapport que les rayons des tambours C et D, et nous verrons que l'emploi de la courroie sans fin, comme intermédiaire, produit le même effet, pour l'action de la force F, qu'une augmentation du bras de levier de cette force, dans le rapport des rayons des tambours C et D. En sorte que, si le rayon du tambour D est double, triple, quadruple, etc., du rayon du tambour C, la force F sera capable de soulever un poids P double, triple, quadruple, etc., de celui qu'elle soulèverait, si elle agissait sur la même manivelle B, appliquée directement au treuil. Il n'est pas nécessaire d'ajouter que, si le rayon du tambour D était plus petit que celui de l'autre tambour, la force F ferait équilibre à un poids plus faible que si elle agissait directement sur le treuil, à l'aide de la même manivelle.

§ 59. **Roues dentées, ou Engrenages.** — Les roues dentées sont destinées, comme les courroies sans fin, à transmettre le mouvement de rotation d'un arbre à un autre; on les emploie dans le cas où les deux arbres, étant parallèles, sont suffisamment rapprochés l'un de l'autre, et aussi lorsque les arbres ne sont pas parallèles.

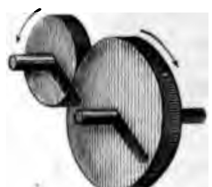


Fig. 71.

Pour communiquer le mouvement d'un arbre tournant à un autre arbre qui lui est parallèle, et qui en est très voisin, on pourrait se contenter d'adapter à ces deux arbres deux tambours dont les surfaces se touchent, *fig.* 71. Si ces deux tambours étaient suffisamment serrés l'un contre l'autre, il se produirait, entre leurs surfaces,

[redacted]

adhérence en vertu de laquelle l'un des deux tambours ne pour-
pas tourner sans entraîner l'autre. Les deux mouvements se-
nt de sens contraire, comme le montrent les flèches placées sur
g. 71. Mais dès que l'arbre auquel le mouvement doit être
smis aurait à vaincre une résistance un peu grande, l'adhérence
erait plus suffisante pour le faire tourner, et un seul des deux
bours tournerait, en glissant sur l'autre.

maginons maintenant que, pour suppléer à l'adhérence, et faire
orte que l'un des deux tambours ne puisse pas tourner sans en-
ner l'autre, on ait disposé sur leurs contours des saillies et des
tés qui *engrènent* les unes dans les autres, et l'on aura ce que
nomme des *roues dentées*, ou bien un *engrenage*. Le mouve-
it se transmettra exactement de la même manière que précé-
ment : mais l'une des deux roues ne pourra pas tourner, sans
marcher l'autre, à moins toutefois que les saillies ou *dents* ne
nent à se briser.

es dents d'une roue dentée sont toutes pareilles, et disposées
ilièrement sur tout le contour de cette roue. Lorsque deux roues
ent engrener l'une avec l'autre, une dent et le creux qui la sé-
de la dent voisine occupent le même espace sur les circonfé-
es de ces deux roues : en sorte que les nombres des dents sont
e eux dans le même rapport que les longueurs de ces circonfé-
es, et aussi dans le même rapport que leurs rayons. Une roue
petite par rapport à la roue avec laquelle elle doit engrener,
nd souvent le nom de *pignon*.

ous le rapport de l'action des forces, les roues dentées se com-
ent de la même manière que les tambours sur lesquels passe une
rroie sans fin.

posons que force F, *fig.* , soit appli- e à la mani- e B, pour e tourner le il A, par l'in- nédiaire des es dentées C D, et faire nter ainsi le

Fig. 72.

ls P. Les dents de la roue C exerceront sur les dents de la roue D
pression t, qui fera équilibre au poids P; mais les dents de la
D réagiront sur les premières, et leur feront supporter une pres-

sion égale et contraire t', qui devra être vaincue par la for
le rayon de la roue C est le tiers du bras de la manivelle B.
sion t' sera le triple de F ; la force t sera donc aussi triple
elle pourra être remplacée, pour vaincre le poids P, par u
égale à F, et agissant sur une manivelle B' dont le bras soi
du rayon de la roue D. Ainsi la force F, appliquée à la ma
et faisant monter le poids P par l'intermédiaire des roues
doit avoir la même valeur que si elle était appliquée à la m
B', fixée directement au treuil A. Remarquons en outre qu
port des longueurs des manivelles B et B' est le même qu
port des rayons des roues C et D, et par conséquent aussi
que le rapport des nombres de dents que portent ces roues
conclurons que, si la roue D a deux, trois, quatre fois plus
que la roue C, la force F pourra soulever un poids doubl
quadruple de celui qu'elle soulèverait, si elle agissait sur
manivelle B, fixée directement au treuil.

La transmission du mouvement de rotation d'un arbre à
arbre qui fait un angle avec le premier, s'effectue d'une
tout à fait analogue, à l'aide de roues dentées appelées *roue*
La *fig.* 73 représente deux roues de cette espèce servan
communiquer l'un avec l'autre deux arbres qui font ent
angle droit. Sous le rapport de la transmission des forces
observer que tout ce qui a été dit pour les roues dentée

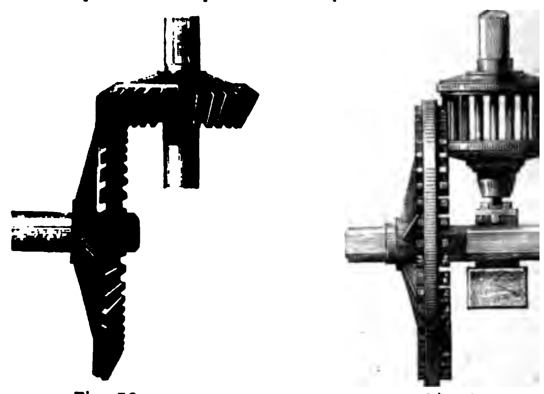


Fig. 73. Fig. 74.

sentées par la *fig.* 72, est applicable aux roues d'angle, s
ait à y changer un seul mot.

La fig. 74 représente un engrenage d'une autre espèce

également à communiquer le mouvement de rotation d'un arbre à un autre arbre qui lui est perpendiculaire. La forme particulière de la plus petite des deux roues lui a fait donner le nom de *lanterne*.

Souvent une roue dentée engrène avec une barre garnie de dents, fig. 75, en sorte que, lorsque la roue tourne, la barre marche dans le sens de sa longueur. Une pareille barre dentée se nomme une crémaillère. La résistance qui est appliquée à la crémaillère, et qui tend à s'opposer à son mouvement, se transmet intégralement aux dents de la roue; cette résistance, et la force qui agit sur une manivelle, pour faire tourner la roue, doivent donc être entre elles dans le rapport inverse du rayon de la roue et du bras de la manivelle.

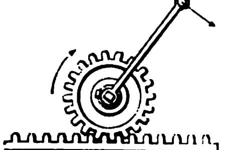


Fig. 75.

§ 60. **Cric.** — Comme exemple de l'emploi des roues dentées, pour exercer des efforts considérables, nous prendrons le cric, fig. 76, qui sert à soulever d'une petite quantité des corps très pesants

Une crémaillère A engrène avec un pignon C; sur l'axe de ce pignon est fixée une roue dentée B, qui tourne en même temps que lui, et qui engrène avec un second pignon D : enfin l'axe de ce second pignon est muni d'une manivelle E. On introduit l'extrémité de la crémaillère au-dessous du corps qu'on veut soulever, puis on fait tourner la manivelle dans le sens indiqué par la flèche ; le pignon D suit la manivelle, et fait tourner la roue B ; le pignon C est entraîné par cette roue, et fait monter la crémaillère, qui produit ainsi l'effet qu'on voulait obtenir.

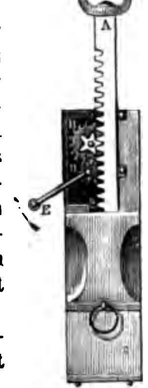


Fig. 76.

Évaluons la force qui doit être appliquée à la manivelle, pour faire équilibre à la résistance que doit vaincre la crémaillère. Nous supposerons, pour cela, que le bras de la manivelle soit égal à 5 fois le rayon du pignon C : que le pignon D porte 6 dents, et que la roue B en porte 18. Si la manivelle agissait directement sur le pignon C, la force qui lui serait appliquée, ayant un bras de levier 5 fois plus grand que celui de la résistance, ne serait que la cinquième partie de cette résistance. Mais l'action de la manivelle sur le pignon C a lieu par l'intermédiaire d'un engrenage, dans lequel la roue B a 3 fois plus de dents que le pignon D : la force appliquée à la manivelle devra donc être 3 fois plus petite qu'elle n'aurait

été sans cela, c'est-à-dire qu'elle ne sera, en définitive, que la quinzième partie de la résistance que doit vaincre la crémaillère. Avec un pareil cric, une force de 40 kilogrammes suffirait pour soulever un poids de 600 kilogrammes.

Le corps du cric est un morceau de bois dans lequel on a prati qué une entaille destinée à loger les roues dentées. Ces roues so recouvertes par une plaque de tôle, traversée par l'axe de la mani velle, et qu'on a supposée enlevée dans la *fig*. 76, afin de laiss voir le mécanisme. Un encliquetage, disposé sur la face extérieure cette plaque, *fig*. 77, permet d'arrêter l'action de la force qui fais

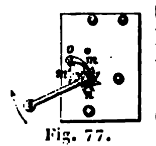


Fig. 77.

tourner la manivelle, sans que pour cela la créma lère cède sous l'effort du poids qu'elle supporte, rentre à l'intérieur du cric, en faisant tourner roues en sens contraire. Un doigt *m*, mobile aut du point *o*, vient s'engager entre les dents d'une r *n*, qui fait corps avec la manivelle. D'après la for des dents et la disposition du doigt, on voit que la manivelle peut tourner que dans un sens, celui indiqué par la flèche. P dant qu'elle tourne, le doigt est successivement soulevé par les verses dents de la roue, puis il retombe successivement, en v de son poids, chaque fois qu'une dent a passé. Lorsqu'on veut f rentrer la crémaillère dans le cric, on n'a qu'à soulever le doigt le faisant tourner autour du point o, pour l'amener dans la posi *m'* : alors il ne touche plus les dents que par sa partie convexe, manivelle se retrouve dans les mêmes conditions que si l'encli tage n'existait pas.

§ 61. **Chèvre.** — Pour élever les matériaux qui servent constructions, on emploie la *chèvre*, qui est une combinaiso treuil, de la poulie, et quelquefois des roues dentées.

La chèvre la plus simple, *fig*. 78, se compose de deux montan bois, réunis par un certain nombre de traverses, et servant de sup à un treuil T et à une poulie P. La chèvre est simplement posé le sol, ou sur un plancher placé à une certaine hauteur, sur le elle s'appuie par les deux extrémités inférieures de ces mont Pour la maintenir dans la position inclinée qu'on est obligé d donner pour la faire fonctionner, on soutient son extrémité C à l d'une corde CD, qu'on attache, soit à un arbre, soit à une ma Le corps qu'on veut élever est saisi par une autre corde qui p sur la gorge de la poulie, et vient aboutir au treuil, sur la su duquel elle est fixée. On fait tourner le treuil à l'aide de leviers q introduit dans des trous disposés pour cela, la corde s'enroule, *corps monte*. La tension de la corde qui se détache du treu

égale au poids du corps que cette corde soutient : la force à employer, pour élever le corps, est donc exactement la même que si la poulie n'existait pas, et que le corps fût directement suspendu au treuil.

La tension de la corde CD, qui maintient la chèvre dans une position inclinée, peut être déterminée par les considérations suivantes. Si cette corde venait à être supprimée, la chèvre tomberait, en tournant autour de la ligne AB. Le poids du corps qu'on élève, et qui tend à produire ce mouvement de la chèvre, est mis en équilibre par la tension de la corde CD; ces deux forces peuvent donc être regardées comme agissant sur un levier, dont les deux bras seraient les distances de la ligne AB à leurs directions ; c'est-à-dire qu'elles doivent être entre elles dans le rapport inverse de ces distances. On voit par là que, plus la chèvre s'approchera d'être verticale, moins la corde CD sera tendue.

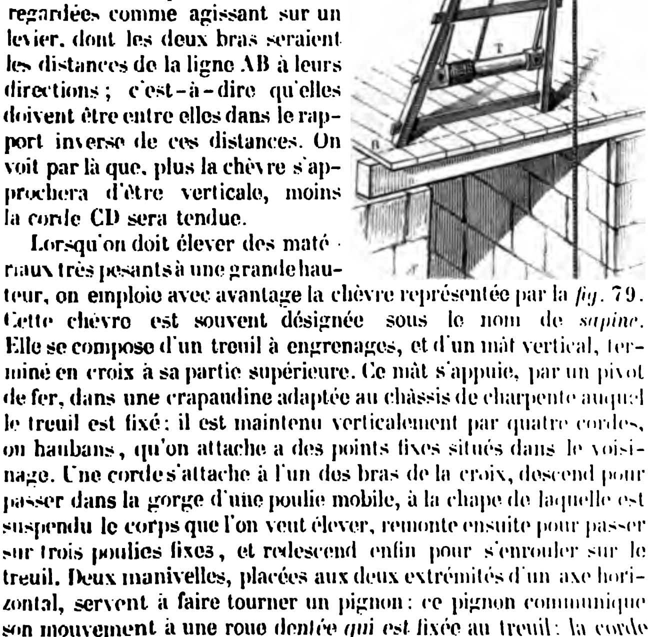
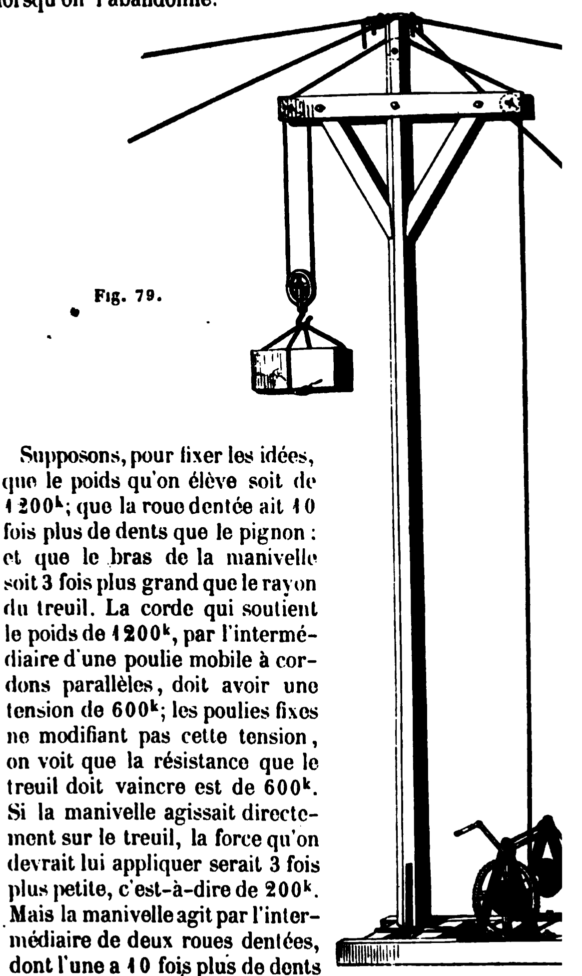


Fig. 78.

Lorsqu'on doit élever des matériaux très pesants à une grande hauteur, on emploie avec avantage la chèvre représentée par la *fig*. 79. Cette chèvre est souvent désignée sous le nom de *sapine*. Elle se compose d'un treuil à engrenages, et d'un mât vertical, terminé en croix à sa partie supérieure. Ce mât s'appuie, par un pivot de fer, dans une crapaudine adaptée au châssis de charpente auquel le treuil est fixé : il est maintenu verticalement par quatre cordes, ou haubans, qu'on attache à des points fixes situés dans le voisinage. Une corde s'attache à l'un des bras de la croix, descend pour passer dans la gorge d'une poulie mobile, à la chape de laquelle est suspendu le corps que l'on veut élever, remonte ensuite pour passer sur trois poulies fixes, et redescend enfin pour s'enrouler sur le treuil. Deux manivelles, placées aux deux extrémités d'un axe horizontal, servent à faire tourner un pignon : ce pignon communique son mouvement à une roue dentée qui est fixée au treuil : la corde s'enroule, et fait ainsi monter le corps. Un encliquetage est adapté à

l'axe des manivelles, pour empêcher que le corps ne red
lorsqu'on l'abandonne.


Fig. 79.

Supposons, pour fixer les idées, que le poids qu'on élève soit de 1200ᵏ; que la roue dentée ait 10 fois plus de dents que le pignon : et que le bras de la manivelle soit 3 fois plus grand que le rayon du treuil. La corde qui soutient le poids de 1200ᵏ, par l'intermédiaire d'une poulie mobile à cordons parallèles, doit avoir une tension de 600ᵏ; les poulies fixes ne modifiant pas cette tension, on voit que la résistance que le treuil doit vaincre est de 600ᵏ. Si la manivelle agissait directement sur le treuil, la force qu'on devrait lui appliquer serait 3 fois plus petite, c'est-à-dire de 200ᵏ. Mais la manivelle agit par l'intermédiaire de deux roues dentées, dont l'une a 10 fois plus de dents que l'autre; la force qu'on doit lui appliquer est don
plus petite qu'elle ne serait sans cela, c'est-à-dire qu'

que de 20^k. Observons enfin que l'axe du pignon porte deux manivelles, une à chaque bout ; si deux hommes agissent ensemble sur ces deux manivelles, chacun d'eux n'aura à exercer qu'une pression de 10^k.

On voit aisément que, d'après la disposition de cette chèvre, les tensions des haubans, qui maintiennent la partie supérieure du mât, ne sont jamais très grandes.

§ 62. **Grue.** — La *grue* est destinée, comme la chèvre, à élever des corps très pesants ; elle se compose, de même, d'un treuil et d'une ou plusieurs poulies. Une corde s'enroule sur le treuil, s'en détache, passe sur les poulies, puis descend verticalement pour saisir le fardeau à élever ; ou bien encore elle passe sous la gorge d'une poulie mobile qui supporte ce fardeau, et vient ensuite, en remontant, s'attacher à un point fixe. Mais en outre, toute la machine peut tourner autour d'un axe vertical ; en sorte que, lorsque le fardeau a été élevé à une hauteur convenable, on peut le faire mouvoir horizontalement, en faisant tourner la grue.

La *fig.* 80 représente une grue construite récemment par M. Cavé pour le port de Brest. La *fig.* 81 montre le mécanisme de cette grue vue par derrière, et à une échelle plus grande. A est le treuil sur lequel s'enroule la corde. B est une roue dentée fixée à l'axe du treuil, et qui tourne en même temps que lui ; elle porte 66 dents. Un pignon C engrène avec cette roue : il porte 11 dents. A l'axe de ce pignon est fixée une roue dentée D, de 54 dents, qui est presque complétement cachée dans la *fig.* 80. Un pignon E, de 9 dents, engrène avec la roue D. Enfin une roue dentée F, également de 54 dents, est fixée à l'axe de ce pignon. Les axes des roues D et F sont placés au même niveau, en sorte que le second cache le premier, sur la *fig.* 81. Au-dessous de ces deux roues, on aperçoit un axe GH, qui passe en avant de la partie inférieure de la roue D, et en arrière de la partie inférieure de la roue F : cet axe, muni d'une manivelle à chacune de ses extrémités, porte deux pignons K, L, de chacun 9 dents, qui, dans la position actuelle, n'engrènent avec aucune des deux roues D et F. Si on le fait glisser dans le sens de sa longueur, vers la droite, le pignon K engrènera avec la roue D ; si au contraire on fait glisser cet axe vers la gauche, le pignon L engrènera avec la roue F. L'axe GH est maintenu dans chacune de ces trois positions différentes par un levier à contre-poids M, qui peut tourner autour du petit axe N, et dont l'une des extrémités, recourbée en forme de crochet, vient s'engager entre des saillies disposées à cet effet sur l'axe GH. Dans la position actuelle des pignons K, L, si l'on fait tourner les deux manivelles, le mouvement ne se transmettra à au-

cune roue, et le treuil ne tournera pas. Lorsque le pignon K engrènera avec la roue D, les manivelles feront tourner le treuil, par l'intermé-

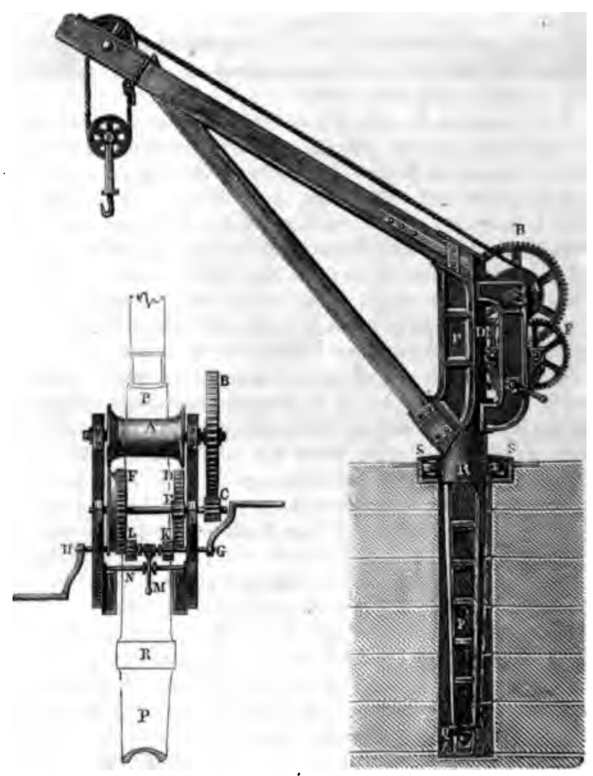


Fig. 81. Fig. 80. (*Échelle de 1 centimètre pour mètre.*)

diaire des roues B, D, et des pignons C, K ; le pignon E et la roue F tourneront, mais sans servir à rien : les choses se passeront comme si ce pignon et cette roue n'existaient pas. Enfin lorsque le pignon L engrènera avec la roue F, les manivelles feront tourner le treuil, par l'intermédiaire des roues B, D, F, et des pignons C, E, L.

Voyons comment on pourra trouver la grandeur de la force qui *devra être appliquée* à chaque manivelle, pour soulever un fardeau *d'un poids connu*. Nous admettrons pour cela que le bras de chaque

ivelle, mesuré perpendiculairement à l'axe GH, soit égal à trois le rayon du treuil : et nous examinerons d'abord la disposition présente le mécanisme, lorsque le pignon K engrène avec la e D. Le fardeau étant soutenu par une poulie mobile à cordons allèles, la tension de la corde est la moitié du poids du fardeau. une seule des deux manivelles agissait directement sur le treuil, e devrait être soumise à une force trois fois plus petite que la sion de la corde : cette force serait donc la sixième partie du ids à soulever. Si cette manivelle agissait sur l'axe du pignon C, force qu'on devrait lui appliquer serait six fois plus petite, c'est-dire la trente-sixième partie du poids à soulever, puisque le pignon C a six fois moins de dents que la roue B. Enfin cette manielle agissant sur GH, et faisant tourner directement la roue D, à aide du pignon K, la force qui doit lui être appliquée sera, par une aison analogue, six fois plus petite que la précédente, c'est-à-dire a deux cent seizième partie du poids du fardeau. Mais l'axe GH est muni de deux manivelles : chacune d'elles devra donc recevoir l'action d'une force 432 fois plus petite que ce poids.

On reconnaîtra sans peine que, dans la seconde disposition, lorsque le pignon L engrènera avec la roue F, la force qu'on devra appliquer à chaque manivelle ne sera que la sixième partie de celle qu'on devait employer dans la première disposition : c'est-à-dire qu'elle devra être 2592 fois plus petite que le poids du fardeau. On voit qu'avec une pareille grue deux hommes pourront soulever un poids énorme. Ils n'auront, par exemple, à exercer sur les manivelles que des pressions d'environ 10^k pour enlever une locomotive dont le poids est à peu près de 25000^k.

La pièce de fonte PP sert d'axe à toute la machine. Elle se termine inférieurement par un pivot Q, qui pénètre dans une crapaudine : et à l'endroit où elle sort du massif de maçonnerie qui doit la maintenir verticalement, elle présente un renflement cylindrique R, à l'aide duquel elle s'appuie contre cette maçonnerie. Des galets S, S, sur lesquels nous reviendrons plus tard, sont disposés tout autour de cette partie R, afin de diminuer autant que possible les frottements qui se développent, lorsqu'on fait tourner la grue autour de son axe.

Lorsqu'un fardeau très pesant est suspendu à la poulie mobile q termine la grue, tout l'appareil tend à être renversé, et le sera nécessairement, si le massif de maçonnerie n'opposait pas une résistance suffisamment grande. Afin de nous faire une idée de la grandeur de cette résistance, nous allons voir comment on peut trouv la pression que la pièce PP exerce sur ce massif, par sa part

ou, ce qui revient au même, nous déterminerons la pression égale et contraire, que le massif exerce sur cette partie de la grue. Si la maçonnerie n'était pas suffisamment solide, la grue céderait à l'action du poids X du fardeau, *fig.* 82, et tomberait en tournant autour de son extrémité inférieure Q; la pression Y qu'elle supporte en R l'empêche de prendre ce mouvement : les deux forces X et Y se trouvent donc dans les mêmes conditions que si elles agissaient sur le levier coudé *aQb*. Ainsi le rapport de la pression Y, au poids X du fardeau, est le même que le rapport de Q*a* à Q*b*. Si Q*a* est égal à une fois et demie Q*b*, la pression Y sera égale à une fois et demie le poids du fardeau.

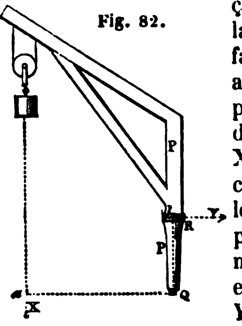


Fig. 82.

Les grues sont employées surtout pour décharger les bateaux. La machine est d'abord amenée dans une position telle que la poulie mobile qui la termine soit placée directement au-dessus du bateau ; après avoir fait descendre cette poulie, ce qui oblige la corde enroulée sur le treuil à se dérouler, on attache le fardeau qu'on veut enlever au crochet par lequel sa chape se termine ; puis on fait tourner le treuil, la corde s'enroule de nouveau, et le fardeau s'élève. Lorsque ce fardeau se trouve ainsi amené à une hauteur suffisante, on fait tourner la grue autour de son axe vertical, jusqu'à ce qu'il soit suspendu au-dessus de l'endroit où l'on veut le déposer ; enfin on laisse aller le treuil au mouvement que tend à lui imprimer la tension de la corde, le fardeau descend, et dès qu'il est convenablement appuyé, soit sur le sol, soit sur la voiture qui doit servir à le transporter, on le décroche, pour opérer de même sur un autre fardeau.

Les grues sont encore employées fréquemment dans les ateliers où l'on a à remuer des corps très lourds, notamment dans les établissements de construction de machines, et dans les fonderies. Plusieurs grues sont disposées à cet effet dans l'atelier, et on les fait fonctionner successivement, lorsqu'on veut transporter une pièce pesante : une première grue saisit cette pièce, et l'amène dans le voisinage d'une seconde, qui la saisit à son tour, pour la transporter plus loin, et ainsi de suite, jusqu'à ce que la pièce se trouve à l'endroit où l'on voulait l'amener. On se sert également de grues pour transporter du foyer à l'enclume les grosses pièces de fer qu'on veut forger, et pour les maintenir sur l'enclume, pendant que les marteaux fonctionnent.

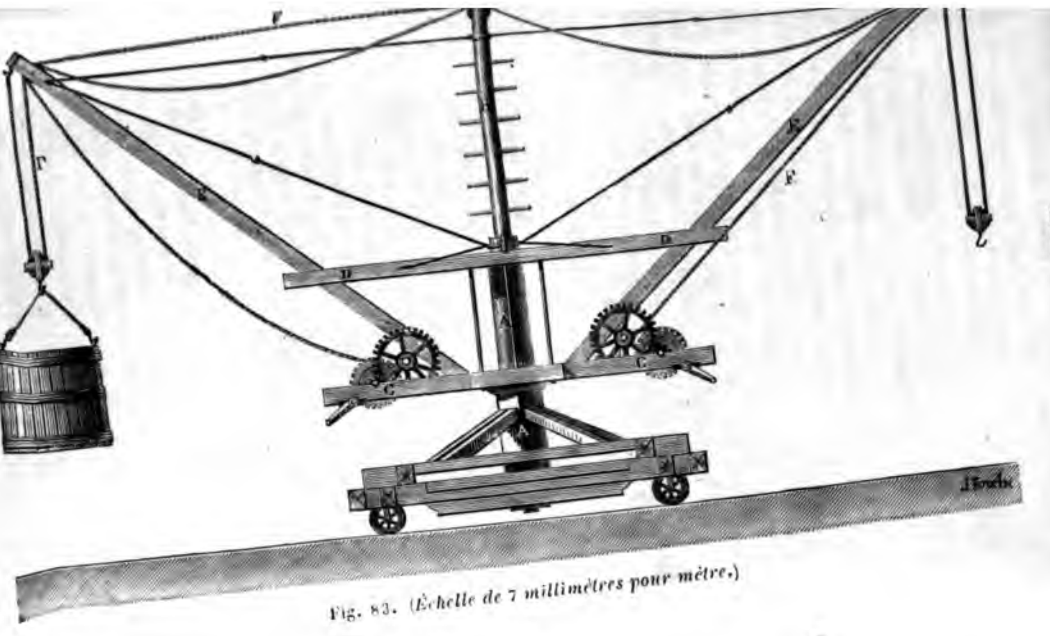


Fig. 83. (Échelle de 7 millimètres pour mètre.)

Enfin on se sert quelquefois de grues mobiles, c'est-à-dire dont l'axe, au lieu de tourner dans un massif de maçonnerie, est porté par un bâti de bois ou de fonte monté sur des roulettes. A l'aide de cette disposition, on peut transporter la grue tout entière à l'endroit où l'on doit s'en servir. Les roulettes doivent être placées sous le bâti de manière que, lorsque la grue fonctionne, la verticale menée par le centre de gravité de la machine tout entière, y compris le fardeau, passe à l'intérieur du polygone formé par les points de contact de ces roulettes avec le sol (§ 42). La *fig*. 83 représente une grue de ce genre, employée à l'embarcadère de Denain. La partie inférieure forme une espèce de chariot, portant en son milieu une grosse pièce de bois verticale AA, qui sert d'axe à la grue. Cette pièce de bois, qui s'élève à la moitié de la hauteur totale de la grue, est creusée circulairement ; elle reçoit dans sa cavité la partie inférieure d'un madrier vertical et cylindrique B, qui peut y tourner librement, et qui forme ainsi comme le pivot de toute la partie mobile. Les madriers horizontaux CC, DD s'appuient, les uns sur la tête de la pièce de bois AA, les autres sur un collier que présente cette pièce : ils sont suspendus par des tringles de fer au madrier vertical B, et servent de points d'appui aux pièces inclinées EE; ces dernières pièces sont d'ailleurs reliées au madrier B par d'autres tringles de fer, qui soutiennent leurs extrémités supérieures. La grue est double : elle est munie de deux treuils à engrenages entièrement pareils, et chacune des pièces inclinées E, E, porte à sa partie supérieure deux poulies montées sur un même axe. Le treuil de droite fonctionne seul, dans la figure ci-jointe : la corde F, qui s'en détache, monte sur l'une des poulies de droite, se rend de là horizontalement sur une des poulies de gauche, et descend pour soutenir le fardeau, à l'aide d'une poulie mobile.

§ 63. **Plan incliné.** — Lorsqu'un corps est appuyé sur une surface plane, et qu'on cherche à le faire glisser sur cette surface, on éprouve une résistance due au frottement. Cette résistance, très grande dans certains cas, est au contraire très faible dans d'autres cas, suivant la nature et le degré de poli que présentent les surfaces qui glissent l'une sur l'autre. C'est ainsi qu'on a une tres grande peine à faire glisser une grosse pierre sur le sol, tandis que si elle était posée sur un traîneau muni de patins, et qu'on voulût faire glisser ce traîneau sur la glace, on y parviendrait beaucoup plus facilement. On peut concevoir que la surface du corps qu'on veut faire glisser, et la surface plane sur laquelle il s'appuie, soient tellement polies, que l'on n'éprouve aucune résistance à produire le glissement. Cet état des corps qui glissent est purement idéal, et ne se réalise

[redacted]

:ndant nous supposerons qu'il soit réalisé, et nous re-
ans ce qui va suivre, le mouvement d'un corps sur une
:, comme pouvant s'effectuer sans la moindre résistance
u frottement. Nous avons déjà admis implicitement
e d'analogue, lorsque nous avons parlé des poulies, des
reuil, des engrenages, etc.: car nous n'avons pas tenu
ésistances qui sont toujours occasionnées, dans ces di-
nes, par les frottements des pièces les unes contre les
amment des tourillons contre les surfaces intérieures
s dans lesquels ils tournent. Nous reviendrons plus loin
ances, dont nous faisons abstraction, afin de voir en
difient les résultats auxquels nous arrivons en les né-

tenir en équilibre un corps pesant, *fig.* 84, qui est
plan incliné AB, on
quer une force Q di-
ement au plan. Cher-
niner la grandeur de
e corps est soumis à
on poids, que nous
résenter par la ligne
peut être décomposé
s, dont l'une GE est

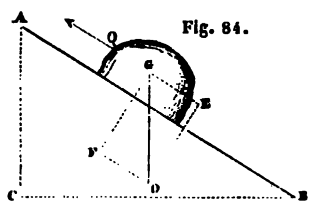


Fig. 84.

plan, et l'autre GF lui est perpendiculaire. La com-
ppuie le corps sur le plan ; mais elle ne tend à le faire
is une direction, ni dans une autre, et est détruite par
lan. L'autre composante GE, au contraire, tend à
re le corps suivant la ligne de plus grande pente du
que la force Q le maintienne en équilibre, il faut
ale et directement opposée à cette composante: on voit
si la force Q ne détruisait qu'une portion de la force
n restante, quelque petite qu'elle soit, ferait descendre
que nous admettons qu'il n'y a aucune résistance qui
frottement.

maintenant que, si nous menons la verticale AC, et
BC, nous formerons un triangle rectangle ABC, qui
e au triangle rectangle DEG ; car, outre que ces deux
chacun un angle droit, les angles en A et en G sont
avant leurs côtés parallèles et dirigés dans le même
ort de EG à DG est donc égal au rapport de AC à
que, si l'on nomme AC la hauteur du plan incliné, et
; *on peut dire que le* rapport de la force Q au poids

du corps est égal au rapport de la hauteur du plan incliné à sa longueur. Si la hauteur AC est le quart, le cinquième, le sixième de la longueur AB, la force Q sera le quart, le cinquième, le sixième du poids du corps.

§ 64. On emploie quelquefois le moyen représenté par la fig. 85

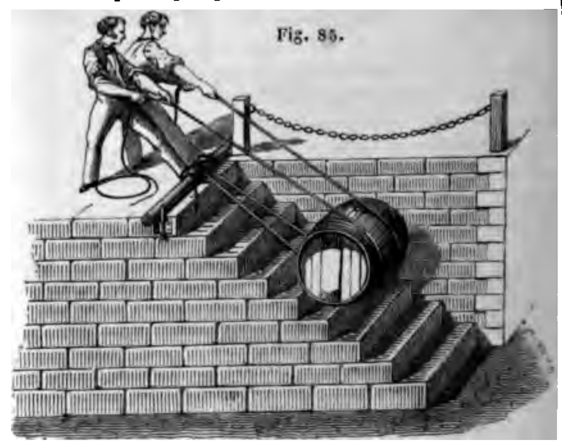


Fig. 85.

pour faire descendre des tonneaux le long d'une rampe, ou d'un escalier. Deux cordes sont attachées par une de leurs extrémités à un morceau de bois, placé transversalement au haut, et maintenu solidement dans cette position ; ces cordes descendent le long du plan incliné, passent sous le tonneau, se relèvent ensuite en embrassant la moitié de son contour, et enfin, se détachant parallèlement à leur direction primitive, elles viennent aboutir dans les mains de deux hommes, qui les tirent suffisamment pour maintenir le tonneau en équilibre. Les deux hommes, en laissant filer lentement les cordes dans leurs mains, font descendre le tonneau aussi doucement qu'ils veulent.

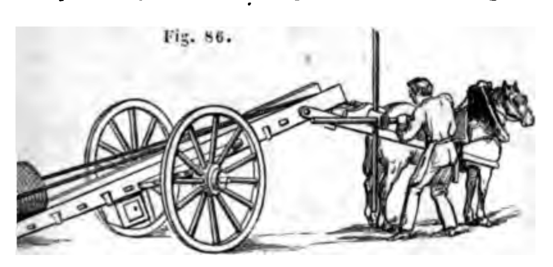
Si les cordes embrassent le tonneau à égale distance de ses deux extrémités, les deux hommes auront la même force de résistance à déployer ; d'un autre côté, les parties de la corde qui reposent sur le plan incliné sont tendues de la même manière que les autres. Le tonneau est donc soumis à l'action de quatre forces égales, parallèles entre elles, et parallèles au plan incliné ; ces quatre forces ont une *résultante quadruple* de chacune d'elles, et qui doit maintenir le *tonneau en équilibre* sur ce plan incliné. En admettant que la ton-

[redacted]

in soit la moitié de sa longueur, cette résultante devra
tié du poids du tonneau : la force déployée par chacun
s, étant quatre fois plus petite, ne sera donc que la hui-
e de ce poids.

ient d'être dit est parfaitement exact dans le cas d'une
n'en est pas tout à fait de même dans le cas d'un escalier.
s de l'escalier amènent de l'irrégularité dans la descente,
ans la grandeur des forces que les hommes doivent ap-
cordes pour retenir les tonneaux : mais on peut regarder
qui varient d'un moment à l'autre, comme étant en
s mêmes que si l'escalier était remplacé par une rampe
ente.

aquet. — Le baquet est une espèce de charrette à long
qui est beaucoup employée pour transporter des ballots
surtout des tonneaux. Les limons ne font pas corps avec
d : ils lui sont attachés seulement par une espèce de
lon de fer, qui traverse sa partie antérieure, et autour des
duquel ils peuvent tourner librement. Ce mode de jonc-
t de faire basculer le brancard, de manière à appuyer
ité postérieure sur le sol ; dans ce mouvement de bas-
nons restent à peu près dans la position horizontale qu'ils
aravant, et le cheval ne s'en trouve nullement gêné. Le
insi placé, *fig.* 86, forme un plan incliné : le chargement


Fig. 86.

rgement des fardeaux s'y feront donc beaucoup plus faci-
sur une charrette ordinaire. Les limons portent en ou-
e voisinage de leur jonction avec le brancard, un tour à
el un homme seul peut charger et décharger des fardeaux
ts.

le haquet est convenablement chargé, on relève l'extré-
rieure du *brancard, qui reprend* ainsi sa position hori-
corde qui s'enroule sur le tour, et qui est destinée à faire

[redacted]

monter les fardeaux sur le brancard incliné, sert ensu toute la durée du transport, à les maintenir dans la p leur a donnée. A cet effet, on la fait passer sur les f l'attache à la partie postérieure du haquet, et, à l'aid lui communique une tension suffisante : puis, afin de m tension, on attache aux limons un des leviers qui serve le tour.

Il nous sera facile de déterminer la grandeur de la f développer un homme, en agissant à l'extrémité de l'u du tour, pour faire monter, sur le brancard incliné, serait attaché à la corde du tour. Admettons que, lorsqu est incliné, la hauteur de sa partie antérieure au-dess le quart de sa longueur : la tension de la corde devra du poids du corps qu'elle fait monter, d'après ce que n dans le § 63. Si le bras de levier de la force développée est dix fois plus grand que le rayon du tour, cette for dix fois plus petite que la tension qu'elle communique elle sera donc aussi quarante fois plus petite que le poi Ainsi, avec une force de 30^k, appliquée à l'extrémit leviers du tour, on pourra faire monter sur le haqu pesant 1200^k.

Cette machine, qui présente une heureuse combinais du plan incliné, est de l'invention de Pascal.

§ 66. **Coin.** — Le coin sert, co pour écarter deux corps l'un de l'a portions d'un même corps, lorsqu ment ne peut s'effectuer qu'en e grand effort. On s'en sert notammen le bois à brûler. Un coin n'est autr prisme triangulaire ABC, *fig.* 87, o de fer, dont une des faces AB est vement aux deux autres faces AC, dernières faces sont d'ailleurs ha égales l'une à l'autre, en sorte que isocèle. En appliquant une force p rement à la face AB, que l'on nomm coin, on détermine son enfoncemen où on l'a préalablement introduit; e un écartement des deux bords d avec lesquels les faces AC, BC son

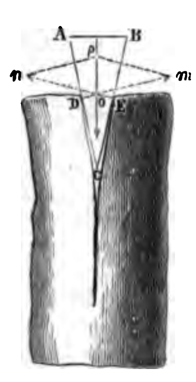


Fig. 87.

Afin de nous rendre compte du mode d'action du coi *à déterminer la* grandeur de la force qu'il faudrait ap

tête AB, pour faire simplement équilibre aux pressions qu'il éprouve en D et en E, de la part des deux bords de la fente. Ces pressions sont perpendiculaires aux faces AC, BC, et nous pouvons les représenter par les lignes *om*, *on* : en construisant le parallélogramme *monp*, nous trouvons *op* pour la ligne qui représente la résultante de ces deux pressions. Pour que la force appliquée sur la face AB fasse équilibre aux deux pressions *om*, *on*, et par conséquent à leur résultante *op*, il faudra qu'elle soit égale et directement opposée à cette résultante. Ainsi *op* doit être perpendiculaire à AB. Mais *om* et *pm* sont respectivement perpendiculaires à AC et BC : donc les deux triangles *omp*, ABC, sont semblables, comme ayant leurs côtés perpendiculaires. Il en résulte d'abord que *om* est égal à *pm*, ou à *on*, puisque AC est égal à BC : c'est-à-dire que les deux faces latérales du coin supportent des pressions égales en D et en E. On en déduit en outre que le rapport de la force qui doit être appliquée sur la tête AB, à l'une de ces deux pressions latérales, est le même que celui de la ligne AB à l'une des lignes AC, BC. On voit donc que, plus l'angle ACB sera aigu, plus la force nécessaire pour produire l'écartement des deux points D, E, sera faible.

§ 67. **Équilibre des cordes ou chaînes qui supportent des corps pesants.** — Lorsqu'une corde ou une chaîne est attachée, par une de ses extrémités, en un point fixe, et qu'elle supporte un corps pesant suspendu à son autre extrémité, elle se dispose verticalement, et sa tension est égale au poids du corps. Mais il arrive souvent que des corps pesants sont suspendus d'une manière beaucoup moins simple : nous allons nous servir d'un exemple bien connu, pour montrer comment on peut, dans tous les cas, déterminer les tensions qui se développent dans les diverses parties de l'appareil de suspension. Nous prendrons pour cela le mode de suspension des lanternes à huile, qui servent à éclairer les rues, et qui ont disparu en grande partie depuis qu'on emploie l'éclairage au gaz.

Une chaîne ABCD, *fig.* 88, est attachée à ses deux extrémités A et D à deux poteaux. Au point C de cette chaîne, est accrochée une poulie F Une corde, attachée en B, passe sous la gorge de la poulie mobile E, qui supporte la lanterne, puis sur les deux poulies F et G, et vient enfin se fixer à un clou placé dans une boîte H, dans laquelle on peut serrer l'excédant de la corde.

La tension de la corde BEFGH doit être la même dans toute son étendue, d'après ce que nous avons vu à l'occasion de la poulie (§ 53). Cette tension s'obtiendra en observant que les tensions des deux cordons EB, EF, *doivent avoir une* résultante égale au poids *de la lanterne : en sorte que, si l'on* porte sur la verticale qui passe

par le point E une longueur Ee qui représente ce poids, et que, par le point e, on mène des parallèles aux cordons EB, EF, on formera

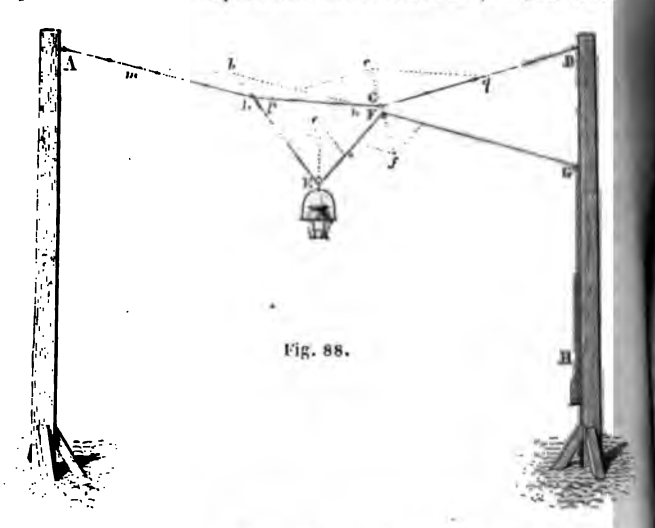


Fig. 88.

un parallélogramme dont les côtés représenteront les tensions de ces deux cordons. Ainsi que nous l'avons déjà vu, ces tensions devant être égales, il est nécessaire que les cordons EB, EF soient également inclinés sur la verticale.

Pour déterminer les tensions des trois parties AB, BC et CD de la chaîne, nous remarquerons que cette chaîne est soumise : 1° en B, à une force dirigée suivant BE, et égale à la tension de la corde, tension dont nous venons de trouver la grandeur ; 2° au point C, à une force qui est la résultante F*f* des tensions des cordons FE, FG. Les tensions des deux parties BA, BC, faisant équilibre à la force qui agit suivant BE, doivent avoir une résultante égale et contraire à cette force. Si donc nous portons, à partir du point B, sur le prolongement de BE, une longueur B*b* égale à la tension de la corde, et que par le point *b* nous menions des parallèles aux parties BA et BC de la chaîne, nous trouverons les lignes B*m*, B*n*, qui représenteront leurs tensions. De même, si nous portons à partir du point C, sur le prolongement de CF*f*, une longueur *Cc égale à Ff*, et que nous formions le parallélogramme C*pcq*, *les lignes Cp, Cq* représenteront les tensions des parties BC, CD.

ıfiguration de la chaîne ABCD devra être telle que les Bn, Cp, déterminées comme on vient de le dire, soient entre elles, puisqu'elles représentent toutes deux la tension . Pour évaluer en kilogrammes les tensions ainsi déterminées, ira de chercher combien de fois les lignes qui les représentent nnent la ligne qui a été choisie pour représenter un kilome.

68. **Chaîne des ponts suspendus**. — Nous pouvons en- . à l'aide des principes exposés précédemment, faire voir com- . on détermine la figure qu'on doit donner aux chaînes qui sup- ent un pont suspendu.

ous supposerons, pour simplifier, que le pont est suspendu à seule chaîne Il est clair que, lorsqu'il y en aura deux, la figure chacune d'elles sera la même que si elle était seule pour suppor- le pont : il n'y aura de différence que dans la charge totale, et r suite dans les tensions des diverses parties de la chaîne: ces nsions seront moitié moindres, dans le cas où le pont sera sup- rté par deux chaînes.

Soit *abcdefgh*, *fig*. 89, la chaîne dont on veut déterminer la

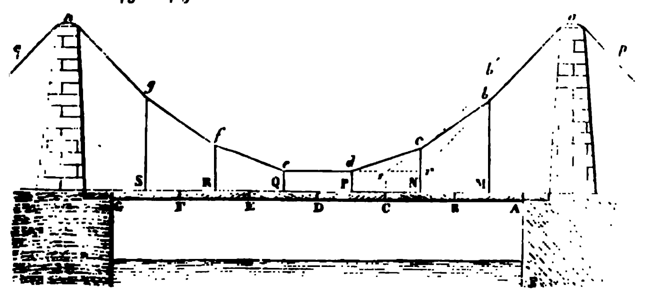


Fig. 89.

gure: et soient M, N, P, Q, R, S, les barres de fer qui servent à spendre le tablier du pont. Voyons d'abord à quelle condition la aîne et les barres de suspension doivent satisfaire, pour que le ont soit convenablement suspendu. Si le tablier était coupé tran- rsalement aux points A, B, C, D, E, F, G, chacune des barres rait à supporter la portion de ce tablier au milieu de laquelle le est fixée. Pour que le pont soit bien construit, il faut que les verses portions du tablier, ainsi détachées les unes des autres, *n restent pas moins sur un même* plan horizontal Car s'il en *it autrement, si quelques unes* s'abaissaient, d'autres s'élève

raient, et le tablier présenterait dans son ensemble une figure sinueuse. Avant d'être coupé en diverses portions, il aurait donc tendu également à prendre cette figure sinueuse: sa flexibilité lui aurait permis de se déformer un peu; mais comme il n'aurait pas pu subir toute la déformation qui se produirait dans le cas où les parties AB, BC, CD,..... seraient complétement détachées les unes des autres, il en serait résulté des tensions très inégales des barres M, N, P...... Ainsi la condition énoncée précédemment doit être remplie, pour que le tablier du pont reste horizontal dans toute son étendue, et que les barres de suspension soient également chargées. C'est cette condition qui va nous permettre de trouver la figure de la chaîne, et les longueurs des diverses barres qui la réunissent au tablier.

Après avoir divisé le tablier en parties égales, par les points A, B, C, D,..... on tracera des lignes verticales par les milieux de ces divisions, pour indiquer les directions des barres de suspension. On placera ensuite, entre les deux barres du milieu, le côté *de* de la chaîne, côté qui doit être horizontal, mais dont la hauteur au-dessus du tablier sera prise à volonté.

Pour trouver la direction du côté *ab*, on observera que les trois portions AB, BC, CD du tablier, qu'on peut supposer attachées ensemble, sont en définitive supportées par les deux chaînons *ab* et *de* : si l'on venait à couper ces chaînons, la portion ABCD du pont tomberait, puisqu'on admet qu'elle est détachée du reste du pont en A et en D. Les tensions des chaînons *ab* et *de* font donc équilibre au poids de cette portion du pont, c'est-à-dire qu'elles doivent avoir une résultante égale à son poids, et dirigée suivant la verticale N, qui passe par son centre de gravité. Il résulte de là que les deux chaînons *ab* et *de* prolongés doivent se rencontrer sur cette verticale On prolongera donc la ligne *de* jusqu'à la rencontre de la verticale N en *r*: puis, en joignant ce point *r* au point *a*, on aura la direction du chaînon *ab*, et par suite l'extrémité supérieure *b* de la barre M.

Pour déterminer la direction du chaînon *bc*, on observera de même que la tension de ce chaînon, et celle de *de*, font équilibre au poids de la portion BCD du pont: ces deux chaînons prolongés doivent donc se rencontrer en un point situé sur la verticale passant par le milieu C de cette portion BCD. Ainsi on prendra le point de rencontre *s* de cette verticale avec le prolongement de la ligne *de*: on joindra ce point *s* au point *b*, déterminé précédemment, et l'on aura la direction du chaînon *bc*, et l'extrémité *c* de la barre N.

Enfin on joindra le point *c* au point *d*, et l'on aura ainsi la forme

moitié de la chaîne. L'autre moitié sera toute pareille, et ses es parties se détermineront de la même manière.

ant aux parties extérieures *ap*, *hq*, on leur donnera la même aison qu'aux chaînons *ab*, *gh*. La chaîne étant simplement sur la partie supérieure *a* du massif de maçonnerie, et pouglisser sur ce massif d'un côté ou d'un autre, on doit regarder ensions des chaînons *ab*, *ap*, comme étant égales ; la résultante es deux tensions sera donc dirigée verticalement, si *ab* et *ap* t également inclinés ; et cette résultante, qui n'est autre chose la pression exercée par la chaîne sur le massif, ne tendra pas renverser, ni à droite ni à gauche.

Les tensions des diverses parties de la chaîne se détermineront s facilement. Si nous considérons, par exemple, les deux chaînons , *bc*, nous voyons que leurs tensions doivent avoir une résultante ale au poids de la portion AB du pont, et dirigée verticalement, bas en haut : on n'aura donc qu'à décomposer cette résultante, *b'*, qui est connue, en deux composantes dirigées suivant *ba* et *bc*. t l'on aura les tensions de ces deux chaînons.

MACHINES A L'ÉTAT DE MOUVEMENT UNIFORME.

§ 69. Les diverses machines dont nous nous sommes occupés jusqu'ici ont été considérées uniquement sous le point de vue de l'équilibre des forces qui leur étaient appliquées. Nous avons vu ainsi comment les efforts se transmettent à l'aide des machines, en se modifiant souvent d'une manière très considérable : en sorte que l'emploi d'un levier, d'un tour, d'un cric, etc., permet de faire équilibre à une résistance très grande, avec une force beaucoup plus petite. Sous ce point de vue, on peut dire que les machines multiplient les forces.

Mais on n'aurait qu'une idée très imparfaite des machines, si l'on se contentait de les considérer ainsi à l'état d'équilibre : cela pourrait même avoir de graves inconvénients, en ce qu'on serait porté à leur attribuer une puissance tout autre que celle qu'elles ont réellement. Si l'on voit encore maintenant beaucoup de personnes qui cherchent le *mouvement perpétuel* (nous entrerons plus loin dans quelques détails sur cette question), cela tient uniquement à ce qu'elles ont quelques notions sur l'équilibre des forces qui agissent sur les machines, et que ces notions n'ont pas été complétées, comme elles devraient toujours l'être, par la considération des mouvements des diverses pièces sur lesquelles ces forces agissent.

Nous allons nous occuper de ce complément indispensable, c'e

à-dire de l'étude des machines à l'état de mouvement Nous supposerons d'abord que les diverses parties dont une machine se compose soient animées de mouvements uniformes : plus tard nous examinerons l'influence que la non-uniformité de ces mouvements peut avoir sur les résultats auxquels nous allons parvenir.

Lorsqu'une machine est à l'état de mouvement uniforme, les forces qui lui sont appliquées doivent se faire équilibre, tout aussi bien que si la machine ne se mouvait pas : car si elles ne se neutralisaient pas mutuellement, elles modifieraient nécessairement les mouvements des diverses pièces dont la machine se compose. Les résultats que nous avons obtenus, relativement à la grandeur de la force capable de faire équilibre à une résistance donnée, à l'aide d'une machine, conviennent donc encore dans le cas où la machine se meut uniformément.

§ 70. **Ce qu'on gagne en force, on le perd en vitesse.** — En examinant les diverses machines que nous avons étudiées jusqu'à présent, il nous sera facile de constater l'existence du principe suivant : *Ce qu'on gagne en force, on le perd en vitesse.*

Prenons d'abord pour cela le levier, droit ou coudé, sur lequel agissent des forces dirigées perpendiculairement aux bras du levier. Les deux forces P, Q, qui se font équilibre sur le levier ACB, *fig.* 90, doivent être entre elles dans le rapport inverse des bras de levier AC, BC. Si le levier tourne uniformément autour du point d'appui C, il prendra, au bout d'un instant, la position A'CB'; et, dans ce mouvement, les deux points A et B décriront deux arcs de cercle AA', BB', proportionnels à leurs rayons AC, BC, puisque ces arcs correspondent à des angles ACA', BCB' égaux entre eux. On voit donc que, si AC est double, triple, quadruple de BC, on pourra bien avec une force P faire équilibre à une force Q deux fois, trois fois, quatre fois plus grande : mais que, d'un autre côté, le chemin parcouru par le point d'application de cette force Q sera deux fois, trois fois, quatre fois plus petit que celui que parcourra dans le même temps le point d'application de la force P. La vitesse du premier point sera d'autant plus faible par rapport à la vitesse du second, *que la force Q qui agit* sur ce premier point sera plus grande par



Fig. 90.

[redacted]

: on peut donc bien dire ici que ce qu'on gagne en vitesse.

obile à cordons parallèles (*fig.* 61, page 48), la doit être appliquée à la corde n'est que la moitié ·ce maintient en équilibre : mais aussi, pour que › certaine quantité, il faut que la main qui tire ɜ quantité double. Le principe énoncé se vérifie cas.

représentées par la *fig.* 63 (page 49), la force de la corde n'est, comme nous l'avons vu, que la ds à soulever. Mais, pour que ce poids monte ut que la longueur de chacun des cordons qui supérieure à la moufle inférieure diminue d'un › la longueur totale de la corde reste la même, .r cela que la main qui tire l'extrémité libre mètres : donc, si la puissance employée est six a résistance à vaincre, d'une autre part elle ne oint d'application de cette résistance que la emin qu'elle parcourt elle-même.

ɛnté par la *fig.* 76 (page 59), nous avons trouvé agir sur la manivelle n'est que la quinzième ɜ à vaincre. Voyons dans quel rapport se trou- :ourus par les points d'application de ces deux le pignon C fera un tour entier, la roue B fera mais le pignon D, qui engrène avec elle, ayant ɜnts, devra faire trois tours. Pour faire faire un t par conséquent faire avancer la crémaillère à la circonférence de ce pignon, il faudra donc e trois tours : et si l'on observe que, le bras de nq fois plus grand que le rayon du pignon C, la décrit est cinq fois plus grande que celle de ce ra qu'en définitive la puissance appliquée à la n chemin quinze fois plus grand que celui que rcourir à la résistance.

79, pag. 62) nous avons vu qu'une seule force, manivelles, devrait être de 20 kilogrammes de 1200 kilogrammes : la puissance est donc ıe la résistance. Pendant que le treuil fait un velle fait dix tours, puisque le pignon fixé à porte dix fois moins de dents que la roue fixée *'a manivelle étant* trois fois plus grand que le *rconférence qu'elle* décrit est trois fois plus

[redacted]

grande que la circonférence du treuil : ainsi, pendant s'enroule sur le treuil d'une quantité égale à cette cir férence, la manivelle parcourt un chemin 30 fois plus la quantité dont s'élève le poids suspendu à la poulie que la moitié de la quantité dont la corde s'enroule s donc, si d'une part la puissance est 60 fois plus petite tance, on voit que d'une autre part elle parcourt un ch plus grand que celui qu'elle fait parcourir à cette rés

§ 71. Dans les divers exemples qu'on vient de points d'application des forces se déplacent suivant même de ces forces, soit dans le même sens, soit en se C'est ainsi que la main qui tire une corde marche dan même de la corde ; la force appliquée à une manivelle ment dirigée suivant la tangente à la circonférence qu velle décrit ; le corps qui est élevé à l'aide des mouf chèvre, monte verticalement, c'est-à-dire en sens co direction de son poids. Mais il n'en est pas toujours a nous allons le voir.

Lorsqu'on fait monter un corps pesant le long d'un pl exerçant une force de traction Q, dirigée parallèlem *fig.* 91, le point d'application D de cette force Q se suivant sa direc centre de gravi est appliquée la f P, égale au poi ne se meut pas s ticale. Les chem par les points d' et G des deux f mêmes, et cepe

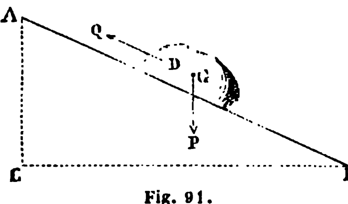


Fig. 91.

ces Q et P ne sont pas égales, puisqu'elles sont entre rapport de la hauteur AC du plan incliné à sa long semble donc que, dans ce cas, le principe énoncé au ment du paragraphe précédent n'est plus vrai. Mais de prendre le déplacement total du point d'applicatio force, on prend la quantité dont ce point s'est déplace *rection* de la force, on reconnaîtra que le principe dont est encore applicable. Lorsque le corps aura glissé su cliné, depuis le point B jusqu'au point A, il se sera é lement d'une hauteur égale à AC : en prenant cette l *le chemin parcouru* par le point d'application de la f *comparant à la* longueur AB, parcourue en même

[redacted]

'application de la force Q, on verra que, si d'une part la force a moitié, le tiers, le quart du poids P, d'une autre part elle rt un chemin double, triple, quadruple du chemin parcouru point d'application de la force P, c'est-à-dire de la hauteur corps s'élève en montant sur le plan incliné.

:es les fois que le point d'application A d'une force F, *fig.* 92 se déplacera en décrivant une ligne igée obliquement par rapport à la on abaissera du point B une perpen- re BC sur la direction de la force, listance AC sera ce qu'on appelle *le parcouru par le point d'application* orce F, *estimé suivant la direction de rce*. En ayant soin de prendre tou- ı ligne AC pour le déplacement du l'application de la force, on recon- jue le principe énoncé au commen- du § 70 est vrai dans tous les .aminons, sous ce point de vue, le uquel sont appliquées des forces dirigées obliquement par aux bras du levier.

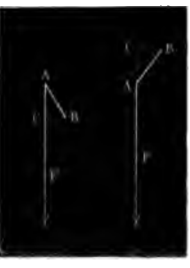


Fig. 92. Fig. 93.

· l'équilibre de ce levier, il faut que les forces P et Q qui lui ppliquées, *fig* 94, soient inversement proportionnelles au li: ulai- . C*b*, :s du appui C direc- :s deux Lors- levier a d'une uantité lu point

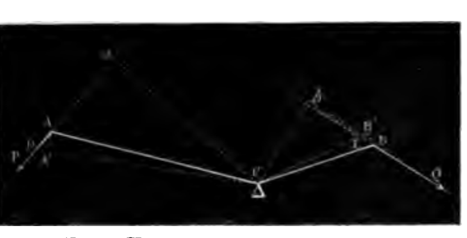


Fig. 94.

C, le point A viendra en A′, et le point B en B′; les s parcourus par ces points, estimés suivant les directions :es, seront AD, BE : et ce que nous devons démontrer, ıe le rapport de AD à BE est le même que le rapport de Pour y arriver, nous observerons que, les arcs de cercle B′ étant très petits, *nous pourrons* les regarder comme de *lignes droites respectivement* perpendiculaires à AC et BC. *gle ADA′ est semblable* au triangle ACa, car ils ont leurs

côtés perpendiculaires entre eux deux à deux : on en conclut donc la proportion

$$\frac{AD}{Ca} = \frac{AA'}{AC}.$$

Mais les triangles BEB', BCb sont aussi semblables, pour la même raison : on en conclura donc de même

$$\frac{BE}{Cb} = \frac{BB'}{CB}.$$

D'ailleurs AA' et BB' étant des arcs de cercle correspondants à des angles au centre égaux entre eux, doivent être proportionnels aux rayons AC et CB : les deux proportions qu'on vient d'écrire ont donc leurs derniers rapports égaux, en sorte que les premiers rapports forment la proportion suivante :

$$\frac{AD}{Ca} = \frac{BE}{Cb}.$$

ou bien, en changeant l'ordre des deux moyens,

$$\frac{AD}{BE} = \frac{Ca}{Cb}.$$

Si enfin nous nous rappelons que les perpendiculaires Ca et Cb sont entre elles dans le rapport de Q à P, nous en conclurons que AD et BE sont aussi entre eux dans le même rapport : c'est ce que nous voulions démontrer.

§ 72. Quelle que soit la complication d'une machine, dans laquelle deux forces se feraient équilibre, nous parviendrions toujours à vérifier, comme nous l'avons fait dans les exemples précédents, que *ce qu'on gagne en force on le perd en vitesse*, en donnant à cet énoncé la signification qui résulte des développements dans lesquels nous venons d'entrer. La généralité de ce principe a été démontrée mathématiquement : mais nous renverrons, pour la démonstration, aux traités de mécanique rationnelle (1). Les vérifications assez nombreuses que nous en avons faites, et que nous pourrions multiplier autant que nous voudrions, suffisent pour que nous l'admettions sans aucune difficulté. Nous regarderons donc désormais comme démontré que, *toutes les fois que deux forces, agissant sur une machine, se font équilibre, elles sont entre elles dans le rapport inverse des chemins parcourus en même temps par leurs points d'application, estimés suivant leurs directions respectives.*

On pourra même se servir de ce principe général pour trouver le rapport qui doit exister entre deux forces appliquées à une machine, pour qu'elles se fassent équilibre : nous allons en donner quelques exemples.

(1) *Ce principe n'est autre chose* que le principe des vitesses virtuelles, que Lagrange a *adopté comme devant servir de base* à la statique, ou à la science de l'équilibre des forces.

[redacted]

se à vis. — La *fig.* 95 représente une machine desti-
ner les corps, et qu'on appelle une *presse*. Une vis A
un écrou B qui est fixe ; elle se termine à la partie
un renfle-
cé de deux
dirigés per-
ent l'un sur
roduit un le-
le ces trous,
ant sur ce
t tourner la
taine quan-
retire le le-
duisant dans
on continue
ner la vis,
on peut de
e lui faire
e tours qu'on
uvement de
produit fait
cendre la vis,

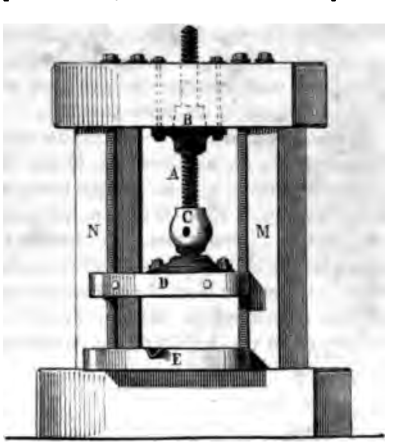


Fig. 95.

la fait tourner dans un sens ou dans l'autre. Un plateau
ouvement ascendant ou descendant, mais sans tourner
ur cela il est dirigé par les deux montants verticaux
pénètrent dans deux échancrures pratiquées dans le
rt et d'autre. Un plateau fixe E est destiné à recevoir
doivent être comprimés. On aperçoit une espèce de
rd antérieur de ce plateau fixe : il correspond à une
ste tout autour de sa face supérieure, et est destiné à
du liquide que la compression peut faire sortir du corps
tion de la presse.

fait tourner la vis dans le sens convenable, elle fait
plateau D, qui vient ainsi s'appuyer sur le corps qui
ır le plateau fixe ; et, en continuant à agir sur la vis,
r ce corps une pression qui peut devenir extrêmement
se faire une idée de la grandeur de cette pression, il
er que, chaque fois qu'on fait faire à la vis un tour
'abaisse en même temps d'une quantité qu'on appelle
ii, pendant que le point d'application de la puissance
rconférence de cercle dont le rayon est égal à la lon-
ier, le point d'application de la résistance marche

d'une quantité égale au pas de la vis. Le principe énoncé dans le § 72 nous autorise à en conclure que : le rapport de la puissance à la résistance est le même que le rapport du pas de la vis à la circonférence qui a pour rayon la longueur du levier. Si l'on pense à la petitesse du pas de la vis, relativement à cette circonférence, on verra qu'à l'aide d'une force assez faible, appliquée à l'extrémité du levier, on peut exercer une pression extrêmement grande sur le corps placé entre les deux plateaux.

§ 74. **Vis sans fin.** — On dispose quelquefois une vis à côté d'une roue dentée, de manière que le filet de la vis s'engage entre les dents de la roue, et que, lorsque la vis tourne, elle fait nécessairement tourner la roue. C'est ce que l'on nomme l'*engrenage de la vis sans fin*. Lorsqu'une vis ordinaire s'engage dans un écrou, et qu'on la fait tourner dans cet écrou, elle s'y enfonce progressivement, et il arrive bientôt un moment où l'on ne peut plus la faire tourner dans le même sens, parce que l'écrou se trouve à l'extrémité du filet de la vis. Ici il n'en est pas de même : on peut faire tourner indéfiniment la vis, et elle fera toujours tourner la roue de la même manière. C'est de là que lui vient le nom de *vis sans fin*.

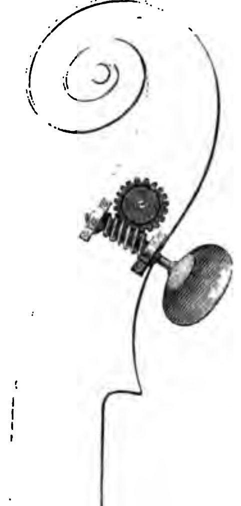


Fig. 96.

La *fig* 96 montre une vis sans fin adaptée à une contre-basse, pour serrer une des cordes de cet instrument. La vis engrène avec une roue qui porte 20 dents, et cette roue est fixée à un petit cylindre sur lequel s'enroule la corde. Lorsque la vis fait un tour entier, la roue avance d'une dent : en sorte que la roue tourne 20 fois moins vite que la vis Il résulte de là que l'effort que la main exerce sur la poignée qui termine la vis, pour serrer la corde, est 20 fois plus petit que celui qui serait nécessaire pour produire le même effet, si cette poignée était directement adaptée au cylindre sur lequel la corde s'enroule.

§ 75. **Treuil différentiel.** — On a vu dans le § 55 (pag. 50) que, pour qu'il y ait équilibre entre la puissance et la résistance appliquées à un treuil, il faut que le rapport de ces deux forces soit égal au rapport du rayon du treuil au bras de levier de la puissance. On

conçoit qu'à l'aide d'une pareille machine, on puisse, avec une puissance donnée, faire équilibre à une résistance aussi grande qu'on voudra : puisqu'il suffit, pour cela, de prendre un treuil dont le rayon soit assez petit relativement au bras de levier de la puissance. Mais, en réalité, il y a des limites qu'il est impossible de dépasser : d'une part, on ne peut pas augmenter outre mesure la longueur du levier sur lequel doit agir la puissance, sans quoi on aurait une machine extrêmement gênante et difficile à manœuvrer ; d'une autre part, on ne peut pas trop diminuer le rayon du treuil, car il ne conserverait plus une solidité suffisante pour ne pas se briser sous l'effort de la résistance à vaincre. Le treuil différentiel a été imaginé pour produire ce que l'on ne peut pas obtenir avec le treuil ordinaire ; avec le treuil différentiel, on peut sans difficulté faire équilibre à une résistance aussi grande que possible, à l'aide d'une puissance aussi petite qu'on voudra.

Ce treuil ne diffère du treuil ordinaire, qu'en ce que sa surface est formée de deux cylindres de rayons inégaux, *fig.* 97, au lieu

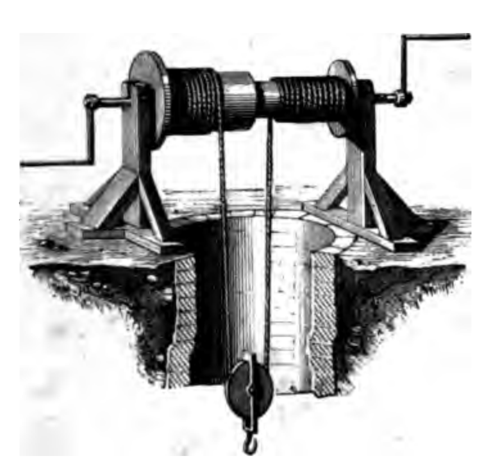


Fig. 97.

d'un seul. Une corde est attachée par une de ses extrémités sur le plus gros des deux cylindres ; après s'y être enroulée de quelques tours, elle *s'en détache, vient passer* sous la gorge d'une poulie *mobile, puis remonte et s'enroule* sur le plus petit des deux cylin-

dres, auquel elle est attachée par sa seconde extrémité. Le corps qui doit être soulevé est suspendu à la chape de la poulie mobile. Des manivelles adaptées aux extrémités du treuil servent à le faire tourner. La corde est disposée, sur les deux parties du treuil, de telle façon que, lorsqu'on le fait tourner dans un sens ou dans l'autre, elle s'enroule d'un côté et se déroule en même temps de l'autre côté. Pour faire monter le corps suspendu à la poulie, on fait tourner le treuil de manière que la corde s'enroule sur le gros cylindre, et se déroule sur le petit. Supposons, par exemple, qu'on ait fait faire deux tours au treuil : la portion de la corde qui s'en détache pour soutenir la poulie se sera raccourcie, d'un côté, de deux fois la circonférence du gros cylindre, et elle se sera allongée en même temps, de l'autre côté, de deux fois la circonférence du petit : donc elle ne sera raccourcie, en réalité, que de deux fois la différence qui existe entre les circonférences des deux cylindres. Cette diminution de longueur de la partie libre de la corde, se répartissant également entre les deux cordons qui soutiennent la poulie, et qui peuvent être regardés comme parallèles, il en résulte que la poulie aura monté d'une quantité égale à la différence des circonférences des deux cylindres. Ainsi, pendant que le point d'application de la puissance parcourt deux circonférences ayant pour rayon le bras d'une des manivelles, le point d'application de la résistance ne marche que de la différence entre les circonférences des deux parties cylindriques du treuil. Si nous appliquons donc le principe du § 72, et que nous observions que les circonférences sont entre elles dans le même rapport que leurs rayons, nous serons conduits à la proposition suivante : Dans le treuil différentiel, la puissance est à la résistance comme la différence des rayons des deux cylindres du treuil est au double de la longueur du levier à l'extrémité duquel la puissance est appliquée.

On reconnait par là l'exactitude de ce qui a été annoncé plus haut, c'est-à-dire qu'avec le treuil différentiel, une puissance donnée peu faire équilibre à une résistance aussi grande qu'on veut : puisqu'il suffit, pour cela, de diminuer suffisamment la différence entre les rayons des deux parties cylindriques du treuil, ce qui n'empêchera pas de lui donner la solidité convenable, et ne le rendra pas plus gênant à employer.

§ 76. **Travail des forces.** — En vertu du principe du § 72, dont nous venons de donner quelques applications, si une puissance et une résistance se font équilibre sur une machine, et que le chemin parcouru par la puissance, estimé suivant sa direction, soit 2 fois, 3 fois, 10 fois plus grand que celui que parcourt la résistance, estimé également suivant sa direction, la puissance doit être 2 fois, 3 fois,

[redacted]

ıs petite que la résistance. Il en résulte que, si l'on mul-
›mbre de kilogrammes qui représente la puissance, par le
· mètres qui représente le chemin parcouru par son point
on, estimé suivant sa direction, et qu'on en fasse autant
sistance, les deux nombres qu'on trouvera par ces deux
.ions seront exactement les mêmes.
me *travail d'une force* le produit ainsi obtenu, en multi-
›rce, évaluée en kilogrammes, par le chemin que par-
point d'application, estimé suivant sa direction, et évalué
. On énoncera donc, de la maniere suivante, la proposi-
l vient d'être question : Lorsqu'une puissance et une ré-
e font équilibre sur une machine, le travail développé
ıissance, pendant un temps déterminé, est égal au
'eloppé par la résistance, pendant le même espace de

'our justifier l'expression de travail employée ici, nous
e voir que le produit, auquel nous donnons ce nom,
ffet, servir de mesure à ce que l'on entend habituelle-
le mot *travail*. D'abord, si l'on réfléchit aux divers tra-
tués, soit par les machines, telles que les roues hydrauli-
s machines à vapeur, soit par les animaux, soit par les
orsqu'ils ont à employer leur force musculaire, on recon-
ıl s'agit toujours de déplacer les points d'application des
s à vaincre. Ainsi le travail consistera à élever des corps
els que des pierres, de l'eau ; à changer les positions res-
es molécules d'un corps solide, comme dans le marte-
r chaud et du cuivre ; à séparer ces molécules, comme
ıvail du bois, de la pierre, dans la mouture des grains.
lifférents cas, et dans tous les autres qu'on pourrait
le travail ne consiste pas seulement à faire équilibre à
ance, mais encore à déplacer le point d'application de
tance. L'idée de travail comprend donc à la fois l'idée
tance vaincue, et l'idée d'un chemin parcouru par son
›lication.
deur du travail effectué par un ouvrier, c'est-à-dire ce qui
de base à la somme qu'on lui paie, dépend évidemment
léments que nous venons de trouver dans l'idée de tra-
ıx ouvriers sont employés à élever des terres à la pelle,
ı à un autre, *fig.* 98, et que l'un d'eux en élève deux
ıe l'autre, il est clair qu'il aura effectué un travail double,
›nséquence il devra recevoir un salaire double de celui
l'autre ouvrier. De même, si l'un de ces ouvriers élève

[redacted]

une certaine quantité de terre à 2 mètres de hauteur, tandis l'autre élève la même quantité à 1 mètre seulement, le pre aura fait un travail double du travail fait par le second, et (être payé deux fois plus. On voit donc que, à égalité de vaincue, le travail est proportionnel à la grandeur du chemin (a fait parcourir au point d'application de cette force, estimé su



Fig. 98.

sa direction; et aussi que, à égalité de chemin parcouru, le est proportionnel à la grandeur de la résistance vaincue. Il sulte nécessairement que le travail est proportionnel au proc la résistance vaincue, par le chemin parcouru par son point plication, estimé suivant sa direction; en sorte qu'on peut pı ce produit pour mesure du travail.

D'après ce qu'on vient de dire, si la résistance vaincue d le double, le triple .. de ce qu'elle était, et que le chemin pa par son point d'application devienne en même temps deu trois fois... plus petit, la quantité de travail effectuée res même : c'est ce que nous allons mettre complétement en évi à l'aide d'un exemple très simple. Un ouvrier agit successivem deux roues à chevilles exactement pareilles, *fig.* 99 et 100 : le du treuil A de la première roue est le tiers du rayon du tı de la seconde roue ; mais le corps suspendu à la corde du t pèse trois fois plus que celui qui est suspendu à l'autre co *en résulte que l'ouvrier* devra être placé de la même mani *les deux roues, pour* faire équilibre à l'un ou à l'autre des de

élever. Si cet ouvrier fait faire le même nombre de tours à cha-une des deux roues, le plus petit des deux corps parcourra une istance verticale trois fois plus grande que l'autre corps, qui pèse ois fois plus que lui : or, le travail développé dans ces deux cas era évidemment le même, puisque l'ouvrier se trouvera dans des onditions tout à fait identiques, en agissant sur l'une ou sur l'autre e ces deux roues.

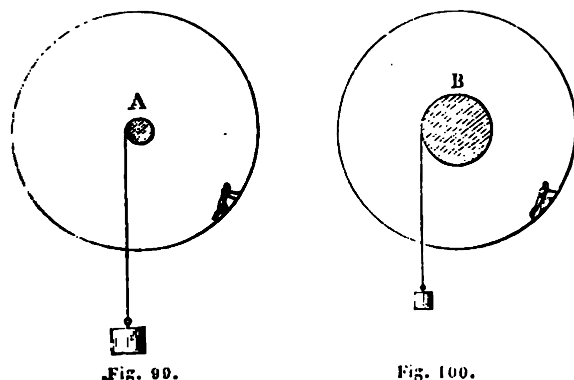


Fig. 99. Fig. 100.

§ 78. **Unité dynamique, kilogrammètre.** — D'après la défi-ition qui a été donnée de ce qu'on entend par le travail d'une rce, il est facile de voir que l'unité de travail sera le travail déve-ppé par l'élévation d'un corps pesant 1 kilogramme, à 1 mètre e hauteur Cette unité est souvent désignée sous le nom d'*unité ynamique*, et aussi sous celui de *kilogrammètre*.

C'est ainsi qu'on dit que le travail développé par l'élévation d'un orps pesant 8 kilogrammes, à 3 mètres de hauteur, est égal à 24 unités dynamiques, ou à 24 kilogrammètres; et on le désigne, n abrégé, par 24^{km}. On dit aussi que ce travail est égal à 24 ki-ogrammes élevés à 1 mètre de hauteur. Toutes ces expressions sont quivalentes, et peuvent être employées indistinctement.

§ 79. **Travail moteur, travail résistant.** — Les forces qui gissent sur une machine en mouvement ne jouent pas toutes le nême rôle. Les unes tendent à augmenter la vitesse du point auquel elles sont appliquées; elles sont dirigées dans le sens du mouvement le ce point, ou au moins leur direction fait un angle aigu avec la irection de ce mouvement. Les autres tendent à diminuer la vitesse *leur point d'application*; elles sont directement opposées au

mouvement de ce point, ou bien leur direction fait un angle obtus avec la direction de ce mouvement. Les premières se nomment *forces motrices*; et les dernières, *forces resistantes*.

Ce que nous avons souvent désigné jusqu'à présent sous le nom de puissance, n'est autre chose qu'une force motrice; au contraire, les resistances vaincues à l'aide des machines que nous avons étudiées rentrent toutes dans ce que nous nommons maintenant forces résistantes. Dans l'opération décrite au § 64, qui consiste à faire descendre un tonneau le long d'un plan incliné, le poids du tonneau est une force motrice : les forces développées par les hommes qui tiennent les cordes sont des forces résistantes. Si les hommes, en tirant les cordes, faisaient remonter le tonneau, les forces de traction deviendraient des forces motrices, et le poids du tonneau serait une force résistante.

Le travail développé par une force motrice se nomme *travail moteur*; celui qui est développé par une force résistante prend le nom de *travail résistant*.

§ 80. **Égalité du travail moteur et du travail résistant.** — D'après ce qu'on vient de dire, la proposition à laquelle on a été conduit dans le § 76 pourra s'énoncer ainsi : *Lorsque deux forces se font équilibre sur une machine en mouvement, le travail moteur produit pendant un temps quelconque est égal au travail résistant produit pendant le même temps.*

Si une machine est animée d'un mouvement uniforme, et qu'elle soit soumise à l'action d'une seule force motrice et de plusieurs forces resistantes, la force motrice devra faire, à elle seule, équilibre à toutes les résistances. On peut imaginer que cette puissance unique soit décomposée en plusieurs puissances partielles, appliquées au même point, suivant la même direction, et dont chacune fasse séparément équilibre à une des résistances. Dans chacun des groupes partiels, ainsi formés d'une portion de la puissance et d'une des résistances, on trouvera que le travail moteur est égal au travail résistant : donc, en réunissant toutes les quantités de travail correspondant à ces divers groupes, on reconnaitra que la somme des travaux moteurs développés par les diverses portions de la puissance, ou, ce qui est évidemment la même chose, le travail moteur développé par la puissance tout entière, est égal à la somme des travaux résistants produits par les diverses résistances.

S'il y a plusieurs forces motrices et plusieurs forces résistantes, appliquées à la fois à une machine animée d'un mouvement uniforme, *toutes ces forces se* neutraliseront encore mutuellement. Chacune

[redacted]

ourra être regardée comme faisant équilibre à une stances, et le travail moteur qu'elle produira sera e des travaux résistants produits par la portion des quelle elle fait équilibre. Donc, en réunissant toutes travail, tant moteur que résistant, on trouvera que ravaux moteurs développés par les diverses forces gale à la somme des travaux résistants développés résistances.

es travaux moteurs produits par les diverses forces r une machine s'appelle, par abréviation, le *travail* en est de même pour la somme des travaux résis- qu'on peut dire en général : *Lorsqu'une machine est on d'un nombre quelconque de forces, et que son mou- orme, le travail moteur total, correspondant à un nps quelconque, est égal au travail résistant total u même intervalle de temps.*

tion, d'une extrême importance pour l'étude des ma- e regardée comme renfermant en elle tout ce que sur les machines considérées à l'état de mouvement e devra jamais la perdre de vue, si l'on ne veut pas ber dans de graves erreurs.

ET MODIFICATION DU MOUVEMENT PAR LES FORCES.

u'une machine ne se meut pas uniformément, les nt appliquées ne se font plus équilibre. Elles peuvent ser en partie ; mais il est nécessaire que les forces rtent sur les résistances, ou, réciproquement, que soient trop grandes pour être équilibrées par les : car, sans cela, il n'existerait aucune cause qui pût vement de la machine, et ce mouvement resterait se rendre bien compte de l'influence que le défaut orces appliquées à une machine peut avoir sur son faut connaître les lois d'après lesquelles les forces odifient le mouvement des corps sur lesquels elles allons nous occuper de l'étude de ces lois. Pour cela ns le mouvement des corps qui tombent librement la pesanteur, et nous étendrons, par analogie, les ous aurons obtenus à l'action de toutes les autres

§ 82 **Chute des corps.** — Un corps qu'on tien
et qu'on abandonne ensuite, to
tement, jusqu'à ce qu'il ait renc(
cle qui s'oppose à la continuatic
vement Tous les corps, ainsi
eux-mêmes, n'emploient pas le
tomber d'une même hauteur: il
des vitesses très inégales. C'e:
balle de plomb, une pierre,
une grande rapidité, tandis qu'
gère, un flocon de neige, une l
mettent un temps beaucoup p
courir la même distance Mais
de vitesse sont dues exclusivem
tance que l'air oppose au mo
divers corps, résistance qui se f
coup plus sur les uns que sur l
ce qu'on peut mettre complétem
par l'expérience suivante.

On prend un gros tube de v
2 mètres de longueur, fermé :
trémités par deux montures (

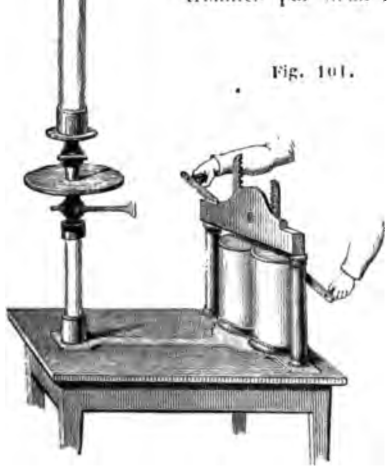
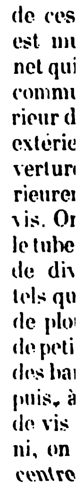


Fig. 101.



de ces
est mu
net qui
commu
rieur d
extérie
vertur(
rieurer
vis. Or
le tube
de div
tels qu
de plo
de peti
des bar
puis, à
de vis
ni, on
centre

d'une machine pneumatique, *fig.* 101: on ouv

: l'air contenu dans l'intérieur du tube, en manœuvrant
ıe (nous verrons plus tard en quoi consiste cette ma-
comment on s'en sert pour faire le vide). Lorsqu'il
plus dans le tube qu'une quantité d'air insignifiante, on
·obinet, on dévisse le tube, puis on le retourne brusque-
r le mettre dans la position indiquée par la *fig.* 102. Les
ps, qui se trouvaient au bas du tube
ıremière position, sont ainsi portés ra-
à la partie supérieure de l'espace où
it le vide, et on les voit tomber tous
me manière : partis ensemble de l'une
mités du tube, ils arrivent ensemble à
ıtrémité. Mais si l'on ouvre un peu le
pour laisser rentrer une petite quantité
on le referme presque aussitôt, et qu'on
ıce à retourner brusquement le tube,
que le phénomène a déjà changé ; les
de plomb arrivent les premiers en bas
et les corps plus légers y arrivent en-
uns après les autres, suivant qu'ils ont
u moins retardés par l'air qu'on a laissé
Le retard sera d'autant plus marqué que
laissé rentrer plus d'air, et le phéno-
ıdra toute son intensité lorsque le robi-
naintenu ouvert.
ılte de cette expérience que tous les
nbent avec la même rapidité dans le
que, lorsqu'ils tombent dans l'air, la
: qu'ils en éprouvent est la seule cause
it tomber avec des vitesses très diffé-
ous verrons même, plus tard, que l'air
nent la seule cause qui fait que certains
s que les ballons, les nuages, la fumée,
soustraits à l'action de la pesanteur,
ıt souvent au lieu de tomber ; sans la
de l'air, les ballons, les nuages, la fu-
ıeraient avec la même rapidité qu'une pierre ou une balle

Fig. 102.

ıudier ce qui, dans la chute d'un corps, est dû uniquement
de la pesanteur, il serait bon d'observer cette chute dans
· *vide d'air : mais, comme* l'expérience serait difficile à
que, d'un autre côté, l'effet de la résistance de l'air est

extrêmement faible, lorsqu'elle s'exerce sur des corps qui, sous une petite surface, ont un poids un peu grand, on se contente d'observer le mouvement que de pareils corps prennent dans l'air

§ 83. **Plan incliné de Galilée.** — Si l'on pense à la rapidité avec laquelle tombe une balle de plomb, on reconnaîtra qu'il est, pour ainsi dire, impossible d'observer les espaces qu'elle parcourt pendant les secondes successives qui s'écoulent depuis le commencement de sa chute. Ce qu'on ne peut pas faire d'une manière directe, on le fait en employant des moyens détournés Nous allons voir d'abord en quoi consiste le moyen dont Galilée s'est servi pour découvrir les lois de la chute des corps, lois qui étaient inconnues avant lui (cette découverte date de l'an 1600 environ).

Nous avons vu dans le § 63 (page 69) que, lorsqu'un corps pesant est posé sur un plan incliné, son poids se décompose en deux forces, dont l'une est dirigée perpendiculairement au plan, et l'autre parallèlement à ce plan. La première composante ne tend qu'à appuyer le corps sur le plan, sans agir en aucune manière pour le faire mouvoir dans un sens plutôt que dans l'autre. La deuxième composante, au contraire, qui est dirigée parallèlement au plan, peut produire tout son effet, et elle fera descendre le corps le long du plan, si elle n'est pas détruite par une force qui lui soit égale et directement opposée. Le rapport de cette composante au poids total du corps est le même que celui de la hauteur du plan incliné à sa longueur (§ 63) : le corps, pouvant céder librement à l'action de cette composante, se mouvra donc exactement de la même manière que s'il tombait verticalement, et que l'intensité de la pesanteur eut été diminuée dans le rapport de la longueur du plan incliné à sa hauteur Ainsi, en se servant d'un plan incliné dont la hauteur soit dix fois plus petite que sa longueur, on observera un mouvement tout à fait pareil à celui que prendraient les corps en tombant librement, si la pesanteur était dix fois plus petite qu'elle n'est réellement.

Ce moyen ingénieux de diminuer, pour ainsi dire à volonté, l'intensité de la pesanteur, et de diminuer en conséquence la rapidité du mouvement qu'elle occasionne, a été réalisé par Galilée de la manière suivante : Une corde bien unie, de 10 à 12 mètres de longueur, était fortement tendue entre deux points A et B, dont le premier était plus élevé que le second, *fig.* 103 ; deux petites poulies métalliques C, unies par une même chape, étaient posées sur la corde, et un petit poids, suspendu à cette chape, les empêchait de tomber d'un côté ou de l'autre. Les poulies, la chape et le poids *formaient une espèce* de petit chariot, pouvant descendre le long

corde, sans éprouver de résistance bien sensible; et il était fa-
'observer
emin que
bile par-
it pen-
la 1re, la
a 3e se-
, à par-
lu com-
ement de
mouve-

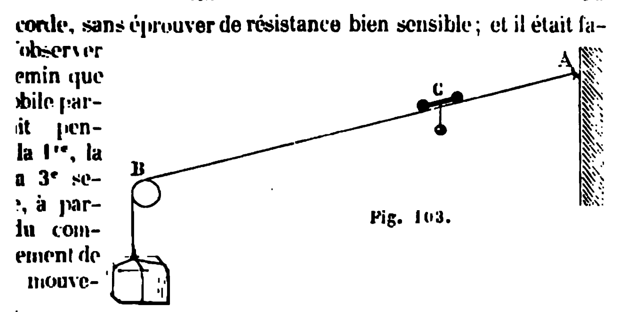


Fig. 103.

14. **Machine d'Atwood.** — Atwood, physicien anglais, a
né, pour observer les lois de la chute des corps, une machine
t plus commode que le plan incliné de Galilée. Voici en quoi
onsiste.

fil de soie très délié passe dans la gorge d'une poulie extrê-
nt mobile, qu'on aperçoit à la partie supérieure de la machine,
14, et supporte, à ses deux extrémités, deux corps de même
La mobilité de la poulie est obtenue par un mode particulier
pension de son axe, qui repose sur les circonférences de
roues placées, deux en avant, deux en arrière (nous revien-
plus tard sur ce mode de suspension). Les deux corps attachés
ux bouts du fil ayant exactement le même poids, la poulie
mmobile, puisque les deux forces qui lui sont appliquées se
uilibre : mais, si l'on vient à ajouter un petit poids d'un côté,
ibre sera troublé, et le fil se mettra en mouvement, en faisant
r la poulie. Supposons, pour fixer les idées, que les deux
suspendus primitivement aux deux extrémités du fil pèsent
n $4^{gr}\frac{1}{2}$, et que le poids additionnel qui détermine le mouve-
oit de 1^{gr}. Qu'il y ait équilibre ou mouvement, les poids des
premiers corps se neutralisent toujours, par l'intermédiaire
oulie, la force de 1^{gr} produit seule le mouvement des trois
qui pèsent ensemble 10^{gr} : ce mouvement sera donc le même
les trois corps tombaient librement, et que l'intensité de la
eur ait été rendue dix fois plus petite. Si les poids des deux
ers corps étaient de $49^{gr}\frac{1}{2}$ chacun, et que le poids addition-
t toujours de 1^{gr}, on reconnaîtrait encore que le mouvement
t serait le même que si les trois corps tombaient librement,
l'intensité de la pesanteur ait été rendue cent fois plus
On voit, par là, que la machine d'Atwood permet, tout aussi
ue le plan incliné, de diminuer à volonté le mouvement

des corps qui tombent, sans altérer pour cela les lois de c
vement.

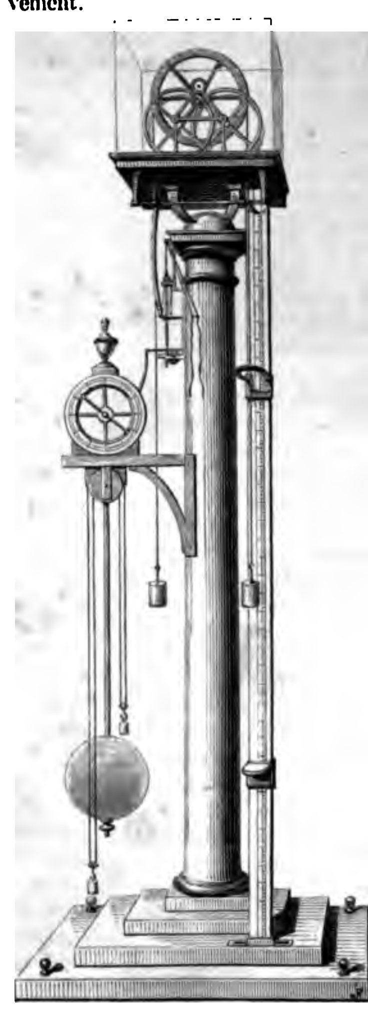


Fig. 101.

Afin de pouvoir étu
cilement les lois du
ment qui est produit p
fet du poids addition
a disposé une règle ve
dans le voisinage de l
que parcourt l'un d
corps en descendan
règle est divisée en c
tres, et munie de de
seurs, dont chacun p
fixé en un quelcon
ses points, à l'aide d
de pression. L'un d
seurs, représenté pa
105, porte un disq



Fig. 105. Fig.

qui est destiné à a
mouvement du co
descend. L'autre, re
par la *fig*. 106, port
neau destiné à laiss
ce corps, mais à ar
même temps le poi
tionnel, qui est allon
effet. Ce poids ad
présente en son mil
petite ouverture circ
une fente latérale à

ı fait passer le fil lorsqu'on veut le poser sur l'un des ı: c'est ce que montre la *fig.* 105, où le corps et le poids l se meuvent ensemble Lorsque le corps et le poids addi- nnent à rencontrer l'anneau, *fig.* 106, le corps principal • et continue son mouvement: mais le poids additionnel et repose par ses extrémités sur les bords de l'anneau.

anisme d'horlogerie, fixé à la colonne de la machine, sert le temps. Il fait mouvoir une aiguille sur un cadran, et lui ırir une division en une seconde: en outre, il fait entendre uit bien net au commencement de chaque seconde, de ı peut compter les secondes qui s'écoulent depuis le com- t d'une expérience, sans avoir besoin de regarder le in que les corps suspendus aux extrémités du fil se met- ouvement bien exactement au commencement d'une des ue marque le mécanisme d'horlogerie, c'est ce mécanisme qui détermine le commencement du mouvement. A cet ps qui porte le poids additionnel, et qui, en descendant, uvoir le long de la règle divisée, est soutenu par l'extré- e d'un doigt métallique: ce doigt, mobile autour d'un axe , est maintenu au-dessous du corps par un assemblage :, dans le détail desquelles nous n'entrerons pas: mais, t où l'aiguille du mécanisme d'horlogerie arrive à la ı cadran qui est verticalement au-dessus de son centre, ıbaisse brusquement, et le mouvement du corps com- produire. Il est clair que, pour la commodité des obser- : zéro de la graduation de la règle divisée doit être au la partie inférieure du corps, lorsqu'il est maintenu im- le doigt dont on vient de parler.

ois de la chute des corps. — Une première expé- re, à l'aide de la machine d'Atwood, consiste à observer s parcourus par les corps mobiles, pendant une seconde, des, trois secondes..., à partir du commencement de leur t. Pour cela on place le curseur à disque plein de ma- a face supérieure se trouve de 16 centimètres au-dessous la règle divisée, *fig.* 107 : puis on cherche, par le tâton- ıelle doit être la grandeur du poids additionnel, pour que ıi est soutenu par le doigt parcoure ces 16 centimètres ı en une seconde: on le reconnaît à ce que le corps, mmencement d'une seconde, vient choquer le disque du commencement de la seconde suivante.

se ensuite le curseur, jusqu'à ce qu'il soit à 64 centi- *de-sous du zéro, fig.* 108, et l'on voit que le corps, mis

en mouvement par le même poids additionnel, em
condes à aller de son point de départ au point où le

En abaissant encore le
nière à l'amener à 1m,4
109, et recommençant l
voit que trois secondes
par le corps pour parc
velle distance.

Ainsi, d'après ces e
en 1s, le corps parcour
en 2s,. . . .. il parcourt
à-dire 4 fois plus :
en 3s,...... il parcourt
à-dire 9 fois plus.

Il en résulte que *les es*
par un corps qui tombe
l'action de la pesante
depuis son point de dé
eux comme les carrés
ployés par le corps à
On voit par là que nou
son, dans le § 12, de d
vement d'un corps qui
exemple du mouvemen
les espaces qu'il parco
proportionnels aux ten
les parcourir.

§ 86. Nous avons i
même paragraphe, ce
la vitesse dans un mou
un moment déterminé
qu'on devait entendre p
du mouvement uniform
rait, si, à partir du mon
sidère, le mouvement

Fig. 107. Fig. 108. Fig. 109.

modifier. La machine d'Atwood permet, comme
voir, de réaliser ce que suppose cette définition
deux corps, suspendus aux deux extrémités du
mouvement par un poids additionnel, l'action in
poids accélère constamment le mouvement. Mais
descend, et sur lequel est posé le poids additionnel
contrer le curseur à anneau, il continue son chemi

[redacted]

andis que le poids additionnel est arrêté, comme le
;. 106 Dès lors les deux corps se meuvent seulement
: leur vitesse acquise: leur poids se faisant équilibre
nt, aucune force ne tend à modifier leur mouvement,
iséquent, est uniforme.
nité du mouvement ainsi obtenu peut
: de la manière suivante. On prend
orps suspendus au fil, et le même
ionnel que dans le paragraphe qui
i place le curseur à anneau de ma-
ter le poids additionnel, lorsque le
lescend a parcouru une distance de
:res: et enfin, on dispose le curseur à
ianière que sa face supérieure soit à
tres du zéro, ainsi que le montre la
i produisant le mouvement, par l'in-
du mécanisme d'horlogerie, on voit
d'une seconde le poids additionnel
et qu'au bout de deux secondes le
continué à descendre vient choquer
Si l'on recommence ensuite l'expé-
r cette seule différence que le cur-
que soit abaissé jusqu'à 80 centi-
zéro, comme le montre la *fig.* 111,
l s'écoule encore une seconde, depuis
:ement du mouvement jusqu'au mo-
anneau arrête le poids additionnel;
corps, qui continue à descendre, met
les à aller de l'anneau au disque.
e que le corps qui descend, après
le poids additionnel sur l'anneau,
2 centimètres en une seconde, et 64
:ondes : ce qui vérifie l'uniformité de
nent.
uver la vitesse que possède le corps
l sous l'action du poids additionnel,
seconde, deux secondes, trois secon-
ite, il suffit donc de placer le cur-
eau de telle manière qu'il arrête le
onnel après une seconde, deux secondes, trois secondes,
commencement du mouvement; puis de déterminer
arcouru pendant une seconde, après que le mouve-

Fig. 110. Fig. 111.

ment a été ainsi rendu uniforme. L'expérience peut se
la manière suivante. On place d'abord l'anneau à 16 cen
du zéro, et le disque à 48 centimètres, *fig.* 112; et l'on v
bout d'une seconde le poids additionnel e
par l'anneau, et qu'au bout de deux se
corps vient choquer le disque : la vitesse
après une seconde de chute, est donc de
mètres par seconde. Puis on descend l'
64 centimètres du zéro, et le disque à 1
mètres du même point, *fig.* 113; le mo
étant produit, l'anneau arrête le poids
nel au bout de deux secondes, et le co
que le disque une seconde après, c'est-à
bout de trois secondes : la vitesse acqui
deux secondes de chute, est donc de 64
tres par seconde. Il résulte évidemm
que *la vitesse acquise à un moment qu
par un corps qui tombe librement sous
de la pesanteur, est proportionnelle
qui s'est écoulé depuis le commencement
vement.*

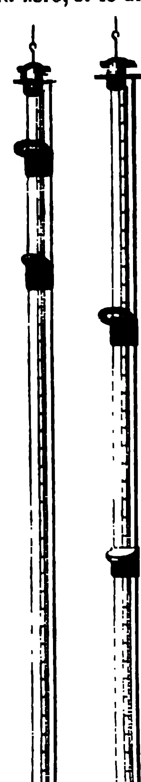


Fig. 112. Fig. 113.

C'est cette proportionnalité entre l
écoulés et les vitesses acquises à la fi
temps, qui a fait donner au mouvem
corps qui tombe, et à tout mouvement
nature, le nom de *mouvement uniformé
céléré.*

Si nous observons, de plus, que le cor
avoir parcouru avec le poids additio
distance de 16 centimètres dans la pre
conde, possède à la fin de ce temps un
de 32 centimètres par seconde, nous e
rons cette autre loi : *La vitesse acquis
corps qui tombe, après une seconde
est double de l'espace qu'il a parcouru
cette seconde.*

§ 87. Les lois que nous venons de trouver, à l'aide de la
d'Atwood, peuvent être représentées par des formules al
très simples, qui sont d'un fréquent usage.

Désignons par la lettre g la vitesse acquise par un corps
librement sous l'action de la pesanteur, après la premièr
de sa chute. D'après ce que nous venons de voir, aprè

[redacted]

hute, la vitesse acquise sera $2g$; après trois secondes lle sera $3g$;.... donc, après t secondes de chute, elle si nous appelons v cette vitesse acquise, nous aurons la

$$v = gt.$$

in parcouru pendant la première seconde de la chute itié de la vitesse acquise au bout de cette seconde, sera par $\frac{1}{2}g$. En vertu de la première des lois que nous avons chemin parcouru pendant les deux premières secondes $\frac{1}{2}g$; le chemin parcouru pendant les trois premières se- 9 fois $\frac{1}{2}g$;.... donc le chemin parcouru pendant les t econdes sera $\frac{1}{2}gt^2$, et si nous désignons ce chemin par ons cette autre formule

$$h = \frac{1}{2}gt^2.$$

i nous observons que, de notre première formule, nous $v^2 = g^2t^2$; et que la seconde nous donne $t^2 = \frac{2h}{g}$, nous ons

$$v^2 = 2gh, \text{ ou bien } v = \sqrt{2gh}.$$

rnière formule servira à trouver la vitesse qu'acquerrait n tombant d'une hauteur donnée. Elle nous sera utile is nous occuperons du mouvement des liquides et des

our qu'on puisse se servir des formules qui précèdent, il ire de connaître la valeur de la lettre g : on pourra la de la manière suivante. On laissera tomber une pierre, ne balle de plomb, du haut d'une tour dont on connaîtra et l'on comptera, à l'aide d'une montre, le nombre de ue ce corps mettra à parcourir toute cette hauteur : on ensuite, dans la formule $h = \frac{1}{2}gt^2$, h par la hauteur de rimée en mètres, et t par le nombre de secondes qu'on ı, et l'on en déduira la valeur de g.

n n'est pas très exact, à cause de la rapidité de la chute ussi n'est-ce pas celui qu'on emploie réellement, et ne vir qu'à donner une idée grossière de la valeur de g. ns bientôt comment cette valeur se détermine avec une ctitude par les observations du pendule : mais nous adop- édiatement le résultat que ces observations fournissent, nettrons qu'on a

$$g = 9^{m},8088.$$

int de cette valeur de g, et se servant de la formule *, on peut calculer la* vitesse que possède un corps qu

est tombé d'une hauteur donnée, ou bien ce qu'on appelle simplement la *vitesse due à cette hauteur*. Le tableau suivant contient les résultats fournis par ce calcul, et correspondant à un grand nombre de valeurs de la hauteur de chute.

HAUTEUR de chute.	VITESSE acquise.	HAUTEUR de chute.	VITESSE acquise.
m	m	m	m
0,25	2,214	14	16,572
0,50	3,132	15	17,154
1	4,429	16	17,717
2	6,264	17	18,262
3	7,672	18	18,791
4	8,858	19	19,306
5	9,904	20	19,808
6	10,849	30	24,260
7	11,718	40	28,013
8	12,528	50	31,319
9	13,288	60	34,308
10	14,006	70	37,057
11	14,690	80	39,616
12	15,343	90	42,019
13	15,970	100	44,292

§ 89. Lorsqu'un corps pesant est lancé verticalement et de bas en haut, il monte jusqu'à une hauteur plus ou moins grande, suivant la grandeur de la vitesse d'impulsion qui lui a été imprimée. A mesure qu'il s'élève, sa vitesse va en diminuant : bientôt elle s'annule complétement, le corps s'arrête un instant, puis il redescend en parcourant le même chemin, avec des vitesses qui vont constamment en augmentant. Au moment où, en descendant, il repasse par le point d'où il est parti, il a repris exactement la vitesse qui lui avait été donnée lorsqu'on l'avait lancé : c'est ce qu'on démontre à l'aide de l'expérience suivante

Imaginons qu'on ait adapté à la règle de la machine d'Atwood deux curseurs à anneaux, tellement disposés que l'un de ces anneaux puisse être traversé par le corps suspendu à l'une des extrémités du fil, et que l'autre puisse l'être également par le corps suspendu à

xtrémité, *fig.* 114 et 115. Pour déterminer le mouvement eux corps, on place un poids additionnel sur celui de droite, end sous l'action de ce poids, *fig.* 114 ; mais en même temps orps monte, et au moment où le premier, en traversant de droite, abandonne son poids additionnel, le second en m exactement de oids, qui a été dis- vance sur l'anneau he, *fig.* 115. Le ent continue en la vitesse acquise; dis qu'il s'accélé- l'action du pre- ds additionnel, il it de plus en plus ion du second, qui e dans les mêmes s qu'un corps pe- é de bas en haut . corps se meuvent ours dans le même qu'à ce que leur oit complétement par la résistance it ce second poids el Alors, après un l'arrêt, ils repren- nouvement en sens ; le poids de gau- end d'un mouve- céléré, et aban- ntôt son poids ad- sur l'anneau qu'il

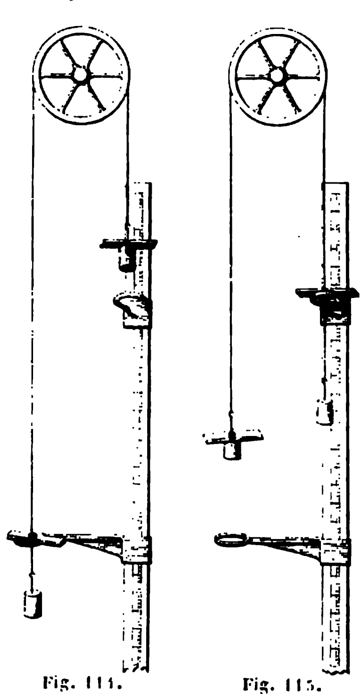


Fig. 114. Fig. 115.

le poids de droite reprend, en même temps, celui qu'il ndonné en descendant : le mouvement se ralentit de nou- rête, puis recommence en sens contraire : et ainsi de

e le poids additionnel de droite est abandonné, en descen- l'anneau qui lui correspond, il possède une certaine vi- a été produite par l'action de la pesanteur sur ce poids, de- oment *où il a commencé à descendre*, et qui dépend de *de sa chute. Mais, en même temps*, le corps de gauche,

qui monte avec une vitesse égale, saisit l'autre poids addition
et lui communique instantanément la même vitesse : ce sec
poids additionnel se trouve donc lancé de bas en haut avec la
tesse que le premier avait acquise en tombant. Or, on observe
la hauteur à laquelle le second s'élève, en vertu de sa vitesse d'i
pulsion, est égale à celle dont le premier était tombé : en sorte
lorsque ce second poids, qui se trouve dans les mêmes condit
que l'autre, sera redescendu de cette hauteur, il aura acquis
haut en bas la vitesse avec laquelle il avait commencé à se m
voir de bas en haut : c'est ce qui confirme bien la proposition én
cée il y a un instant.

Ainsi, le tableau contenu dans le § 38 peut donner une idé
la hauteur à laquelle s'élèvera un corps, d'après la vitesse d'
pulsion qu'on lui aura transmise de bas en haut.

§ 90. **Appareil de M. Morin.** — On peut encore étudie
lois de la chute des corps au moyen de l'appareil suivant,
M. Morin a indiqué la disposition.

Un cylindre vertical AA, *fig.* 116, est susceptible de tourne
tour de son axe de figure. Un mécanisme d'horlogerie B, mú
un poids C, est destiné à lui communiquer un mouvement de
tion uniforme. Nous n'entrerons pas dans le détail des parties
se compose ce mécanisme, et nous ne chercherons pas à faire
prendre comment il peut faire tourner uniformément le cylindre
cela supposerait des connaissances que nous ne possédons pa
core. Mais nous nous contenterons de dire que, lorsqu'on lais
cylindre AA libre de céder à l'action du poids C, son mouve
s'accélère peu à peu pendant quelque temps, puis devient
sensiblement uniforme : ce qu'on reconnaît sans peine, à l'ai
petit bruit que fait entendre une lame mince de baleine a
viennent rencontrer successivement les quatre bras de la r
ailettes adaptée au haut de l'appareil, et animée à chaque ir
d'une vitesse proportionnelle à celle du cylindre AA.

En avant du cylindre AA se trouve suspendu un corps pesa
muni d'un crayon dont la pointe appuie légèrement sur la su
du cylindre. Si l'on vient à décrocher ce corps, il tombe le lo
cylindre ; deux fils métalliques tendus verticalement, et pa
dans des œillets adaptés au corps D, le guident dans cette c
et empêchent qu'il ne s'écarte de la verticale par suite de l'a
de quelque cause étrangère. Il suffit de tirer une petite fice
pour décrocher le corps D, et déterminer ainsi sa chute.

Si le cylindre AA ne tournait pas, pendant que le corps D t
est clair que la pointe du crayon qui lui est adapté tracer

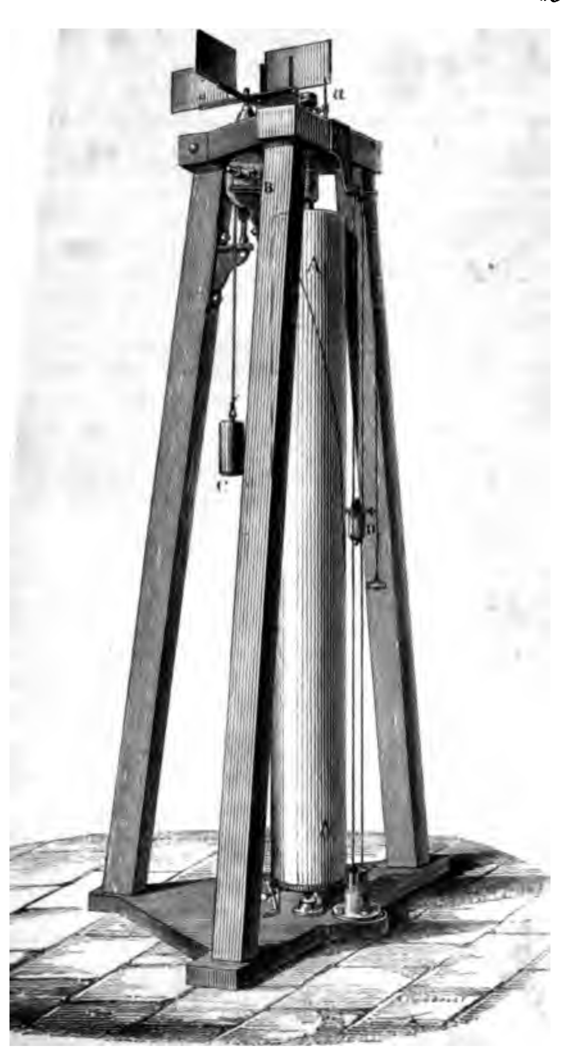
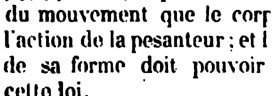


Fig. 116.

le cylindre une simple ligne droite verticale. Lors le cylindre tourne et que le corps D reste immobi crayon trace sur la surface du cylindre une ci cercle horizontale. Mais si l'on détermine la chu pendant que le cylindre est animé du mouveme uniforme que lui a transmis le poids C, le cray surface du cylindre une ligne essentiellement diffé droite et de la circonférence du cercle dont on v Cette ligne courbe *mnpq*, *fig.* 117, dépend évide



du mouvement que le corp l'action de la pesanteur ; et l de sa forme doit pouvoir cette loi.

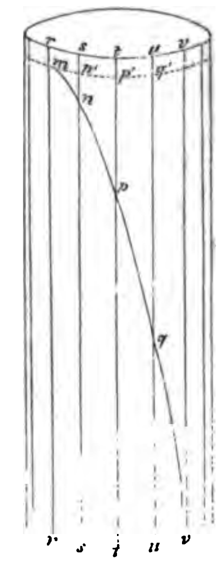


Fig. 117.

Pour faciliter l'étude de courbe *mnpq*, on trace d' surface du cylindre, des lig distantes *rr*, *ss*, *tt*, *uu*, *vv*, trices du cylindre sont ren courbe *mnpq*, en divers poi situés à diverses hauteurs. l marqué par le crayon à l'ins D a commencé à tomber. instant, le cylindre ayant to que la génératrice *ss* vienne de la génératrice *rr*, le corp de la hauteur *nn'*, et le cray point *n*. Pendant un nouv temps égal au précédent, la est venue à son tour se plac crayon, qui y a marqué le de suite. Il est clair, d'ap corps D a employé à tomb *pp'*, un temps double de celu il s'était abaissé de *nn'* : et le temps qu'il a mis à tomber de la hauteur *qq'* est tr temps correspondant à *nn'*. Or, si l'on mesure les ha *qq'*, on trouve qu'elles sont entre elles comme les n ce qui montre que les espaces parcourus par le c du commencement de sa chute, sont proportionnel temps employés à les parcourir.

L'appareil dont il s'agit ne se prête pas, con

twood, à la recherche directe de la loi des vitesses ; il ne donne, mme nous venons de l expliquer, que la loi des espaces parcourus, is il permet de vérifier cette loi des espaces avec une précision ucoup plus grande que celle que comporte l'emploi de cette autre chine.

§ 91. Mode d'action des forces pour produire le mouvement. — Examinons maintenant les lois de la chute des corps, e nous venons de trouver, et voyons les conséquences qu'on ut en tirer, relativement à la manière dont la pesanteur produit mouvement.

Le chemin parcouru pendant la première seconde de la chute, nt la moitié de la vitesse acquise par le corps au bout de cette onde, sera égal à $4^m,9044$, ou, à très peu près $4^m,9$. La loi de proportionnalité des chemins parcourus aux carrés des temps ployés a les parcourir nous conduira donc aux résultats suints :

pendant la première seconde, le corps parcourt		$4^m,9$
pendant les 2 premières secondes.	4 fois	$4^m,9$
pendant les 3 premières secondes.	9 fois	$4^m,9$
pendant les 4 premières secondes.	16 fois	$4^m,9$
pendant les 5 premières secondes	25 fois	$4^m,9$
Etc		

us conclurons de là que :

pendant la 1re seconde, le corps parcourt. . . .		$4^m,9$
pendant la 2e seconde	3 fois	$4^m,9$
pendant la 3e seconde.	5 fois	$4^m,9$
pendant la 4e seconde.	7 fois	$4^m,9$
pendant la 5e seconde.	9 fois	$4^m,9$
Etc.		

Observons maintenant qu'en vertu de la loi de proportionnalité s temps écoulés aux vitesses acquises a la fin de ces temps, la esse acquise

au commencement de la 2e seconde est de . . .	2 fois	$4^m,9$
au commencement de la 3e seconde.	4 fois	$4^m,9$
au commencement de la 4e seconde	6 fois	$4^m,9$
au commencement de la 5e seconde.	8 fois	$4^m,9$
Etc.		

En rapprochant ces différents résultats, nous pouvons faire remarques suivantes :

1° Dans la première seconde, la pesanteur fait parcourir au corps ,9.

2° *Dans la deuxième seconde*, si la pesanteur cessait d'agir, a

parcourrait 2 fois 4ᵐ,9, en vertu de sa vitesse acquise : il parcourt en réalité 3 fois 4ᵐ,9 : donc la pesanteur, en continuant à agir, lui fait parcourir, pendant la deuxième seconde, 4ᵐ,9 de plus qu'il ne parcourrait sans cela.

3° Dans la troisième seconde, si la pesanteur cessait d'agir, il parcourrait 4 fois 4ᵐ,9, en vertu de sa vitesse acquise ; mais il parcourt en réalité 5 fois 4ᵐ,9 : donc la pesanteur, en continuant à agir, lui fait encore parcourir, pendant la troisième seconde, 4ᵐ,9 de plus qu'il n'aurait parcouru sans cela ; et ainsi de suite.

On peut donc dire, en général, que la pesanteur, en agissant sur un corps qui tombe, lui fait décrire, pendant chaque seconde, 4,9 de plus que si le corps s'était mû, pendant toute cette seconde, seulement avec la vitesse qu'il avait acquise au commencement.

A la fin de chaque seconde, la vitesse acquise par le corps surpasse de 2 fois 4ᵐ,9 celle qu'il avait au commencement de cette seconde : on peut donc dire encore que, pendant chaque seconde, quelle que soit la vitesse que possède déjà le corps, la pesanteur lui communique toujours le même accroissement de vitesse.

On doit conclure de tout cela que, *dans le mouvement d'un corps qui tombe librement, la pesanteur agit toujours de la même manière, quelle que soit la vitesse dont le corps est animé.*

Une force, de quelque nature qu'elle soit, peut toujours être assimilée à la force qui provient de l'action de la pesanteur sur un corps : la loi que nous venons de trouver sera donc applicable à cette force, sans aucune modification.

Il semble que, dans certaines circonstances, on observe des faits qui sont en opposition avec cette loi. Si, par exemple, un tonneau repose sur un sol uni et horizontal, et qu'on le fasse rouler en le poussant avec la main, on pourra lui communiquer un mouvement de plus en plus rapide. Mais on sent qu'au commencement du mouvement on a une plus grande action que plus tard : à mesure que le tonneau va plus vite, on accélère de moins en moins sa vitesse, et il arrive un moment où on ne l'accélère même plus. Pour peu qu'on réfléchisse à ce qui se passe dans ce cas, on reconnaîtra qu'il y a une différence essentielle avec ce qui se produit dans le mouvement d'un corps qui tombe librement. On verra, en effet, que plus le tonneau va vite, plus la pression qu'on peut exercer avec les mains diminue ; et que, s'il a atteint la plus grande vitesse que puisse prendre un homme en courant, il ne sera plus possible de continuer à le pousser pour augmenter encore sa vitesse. L'augmentation de la vitesse du tonneau donne lieu à une diminution dans la

ır de la force qui agit sur lui, et c'est pour cela que, plus la
ɛst grande, moins on
ccélérer : mais siée
le pression exercla
mains était toujours
:, elle donnerait lieu
ı au même accrois-
de vitesse dans une
de temps. Le ton-
ı roulant de plus en
te, se soustrait de
plus à l'action des
qui le poussent; tan-
, quelle que soit la
d'un corps qui
il ne se soustrait au-
nt à l'action de la
ur.

. *Les vitesses commu-*
à un même corps,
x forces qui agissent
corps, exactement
s mêmes circonstan-
nt proportionnelles
ndeurs de ces for-
tte proposition peut
fier de la manière
e, à l'aide de la ma-
l'Atwood.

suspendra d'abord,
ıx extrémités du fil,
orps pesant chacun
ammes, et on posera
ls additionnel de 20
es sur celui des deux

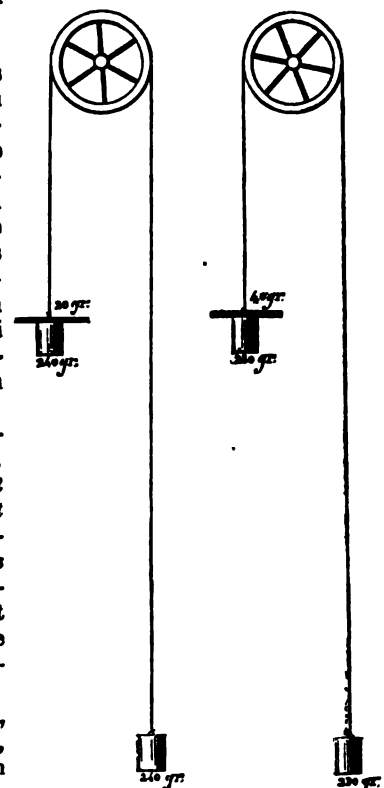


Fig. 118. Fig. 119.

qui se meut le long de la règle divisée, *fig.* 118. Ce poids
ınel déterminera le mouvement des deux corps, et on
, en opérant comme précédemment, déterminer la vitesse
ı par ces corps, après une seconde de mouvement.
remplacera ensuite les deux corps de 240 grammes par deux
pesant chacun 230 grammes, et le poids additionnel de 20
s par un autre de 40 grammes, *fig.* 119 ; puis on détermi-

nera encore la vitesse acquise par les corps, sous l'action de (poids additionnel, après une seconde de mouvement.

On voit que, dans chacun des deux cas, l'ensemble des corps q se meuvent pèse 500 grammes ; on peut donc dire que c'est le mêm corps qui est mis en mouvement, dans le premier cas, par une for de 20 grammes, et, dans le second, par une force de 40 gramme Eh bien ! l'expérience montre que la vitesse acquise, après une se conde de mouvement, est deux fois plus grande dans le second ca que dans le premier. Si l'on faisait une troisième expérience, e faisant mouvoir des corps pesant ensemble 500 grammes, par u poids additionnel de 60 grammes, on trouverait de même que l vitesse acquise, après une seconde de mouvement, serait triple d ce qu'elle était dans le premier cas. La proportionnalité des force aux vitesses qu'elles communiquent à un même corps, sur lequ elles agissent dans les mêmes circonstances, se trouve par là com plétement vérifiée.

§ 93. Cette loi permet d'obtenir très facilement la vitesse qu'un force donnée communiquera à un corps, en agissant sur lui d'un manière régulière pendant un temps déterminé ; ou bien, récipro quement, la grandeur de la force capable de communiquer à un corp une vitesse donnée, en agissant sur lui d'une manière réguliè pendant un certain temps. Les deux exemples suivants suffiron pour montrer ce qu'on doit faire dans toutes les questions de c genre.

Première question. — Quelle vitesse une force de 25^k donnera-t-elle à un corps pesant 140^k, en agissant sur lui pendant une seconde, suivant une même direction ? — Si la force était de 140^k, la vitesse communiquée au corps, après une seconde d'action, serai de $9^m,8088$ par seconde ; la force étant de 25^k seulement, la vitess qu'elle donnera au corps sera fournie par la proportion

$$\frac{x}{9^m,8088} = \frac{25}{140}, \quad x = \frac{9^m,8088 \times 25}{140} = 1^m,752.$$

Deuxième question. — Quelle force devra-t-on appliquer à un corps pesant 140^k, pour qu'en agissant sur ce corps pendant une seconde, dans une même direction, elle lui communique une vitesse d 2^m par seconde ? — Si la vitesse devait être de $9^m,8088$ par seconde la force serait égale au poids même du corps, c'est-à-dire qu'ell serait de 140^k ; la vitesse devant être de 2^m seulement par seconde la grandeur de la force s'obtiendra à l'aide de la proportion suivante

$$\frac{x}{140^k} = \frac{2}{9,8088}, \quad x = \frac{140^k \times 2}{9,8088} = 28^k,546.$$

§ 94. **Masse d'un corps, quantité de mouvement.** — En résolvant la seconde des deux questions qui précèdent, nous avons trouvé que la force capable de communiquer une vitesse de deux mètres par seconde, à un corps pesant 140^k, en agissant sur lui dans une même direction pendant une seconde, était égale à $\frac{140^k \times 2}{9,8088}$; ou bien, ce qui revient au même, égale à $\frac{140^k}{9,8088} \times 2$. Cette force s'obtient donc en divisant le poids du corps par 9,8088, c'est-à-dire par le nombre que nous avons désigné précédemment par g, et multipliant le quotient par le nombre qui représente la vitesse à communiquer au corps. Ce quotient du poids d'un corps par le nombre g est ce qu'on nomme sa *masse;* en sorte qu'on peut dire que la force capable de donner une certaine vitesse à un corps, en agissant sur lui pendant une seconde, est égale au produit de la masse du corps par la vitesse qui doit lui être communiquée.

Il résulte évidemment de là, que, plus la masse d'un corps est grande, et plus la force qui doit lui communiquer une vitesse donnée est grande; et aussi que, plus la masse d'un corps est grande, plus la vitesse que lui communiquera une force donnée sera petite. On voit donc que la signification du mot masse, en mécanique, est bien la même que celle qu'on lui attribue habituellement; on dit, en effet, qu'un corps est plus ou moins massif, que sa masse est plus ou moins grande, suivant qu'on éprouve plus ou moins de difficulté à le soulever, à le déplacer. L'acception vulgaire du mot masse se trouve conservée dans la définition que nous en avons donnée; mais ce qu'il y avait de vague dans cette acception a disparu, et le mot masse nous représentera désormais quelque chose qui peut se mesurer, qui peut s'évaluer en nombre.

On emploie souvent en mécanique l'expression de *quantité de mouvement :* nous sommes en mesure, dès maintenant, de donner une définition précise de cette expression. On appelle quantité de mouvement d'un corps, le produit qu'on obtient en multipliant sa masse par sa vitesse. C'est ainsi qu'on pourra dire, en raison de ce qui a été trouvé au commencement de ce paragraphe, qu'une force est égale à la quantité de mouvement qu'elle communique à un corps, en agissant sur lui, dans une même direction, pendant une seconde.

§ 95. **Mouvement d'un corps pesant sur un plan incliné.** — Lorsqu'un corps, soumis à la seule action de la pesanteur, se trouve sur un plan incliné, il descend le long de ce plan. Son poids se décompose, ainsi que nous l'avons vu au § 63, en une composante *perpendiculaire au plan,* qui ne produit pas d'effet, et une autre

composante parallèle au plan, qui produit seule le mouvement : le rapport de cette dernière composante au poids du corps est le même que le rapport de la hauteur du plan incliné à sa longueur. Cette composante, agissant toujours de la même manière, et dans la même direction, donne au corps un mouvement uniformément accéléré, mais plus lent que celui qu'il prendrait s'il pouvait tomber librement sous l'action de son poids tout entier. Le mouvement ainsi produit présente une circonstance très remarquable : c'est que, quelle que soit l'inclinaison du plan, lorsque le corps, en descendant le long de ce plan, s'est abaissé d'une certaine hauteur mesurée verticalement, il est animé de la même vitesse que s'il était tombé librement de la même hauteur suivant la verticale. Voici comment on peut s'en rendre compte.

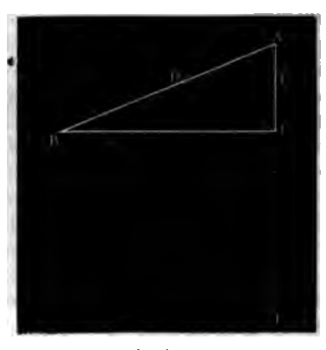


Fig. 120.

Supposons que la hauteur AC du plan incliné soit le tiers de sa longueur AB, *fig.* 120 : la composante du poids du corps, qui est parallèle au plan, et qui détermine seule le mouvement, sera trois fois plus petite que ce poids. La vitesse que le corps aura acquise au bout d'une seconde, sera donc (§ 92) trois fois plus petite que si le corps était tombé librement suivant la verticale; et, de même, l'espace qu'il parcourra pendant la première seconde de son mouvement, sera trois fois plus petit que l'espace qu'il aurait parcouru dans le même temps, en tombant verticalement. On voit, par là, que si l'on prend AF égal à 4^m,9044, et AD trois fois plus petit (ce qui pourra se faire en abaissant FD perpendiculaire à AB), le corps, parti du point A, viendra au point D au bout d'une seconde ; tandis que, s'il était tombé suivant la verticale, il se serait trouvé au même moment au point F.

Menons la ligne horizontale DE : le rapport de AE à AD sera le même que celui de AC à AB, c'est-à-dire de 1 à 3. AE est donc égal au tiers de AD ; mais AD est déjà le tiers de AF : donc AE sera le neuvième de AF. La loi de la proportionnalité des espaces parcourus aux carrés des temps employés à les parcourir, nous montre que le corps, en tombant verticalement à partir du point

[redacted]

A, serait arrivé en E au bout d'un tiers de seconde, puisqu'il arrivait en F au bout d'une seconde. La vitesse qu'il possédera en passant au point E, sera donc trois fois plus petite que celle qu'il acquerra en arrivant au point F ; mais déjà nous avons dit que, dans le mouvement sur le plan incliné, la vitesse du corps au point D, après une seconde de mouvement, sera trois fois plus petite que la vitesse qu'il aurait au point F, après une seconde de chute verticale : donc les vitesses du corps, au point D, dans son mouvement sur le plan incliné, et au point E, dans le mouvement qu'il prendrait en tombant librement suivant la verticale, sont exactement les mêmes.

Ce que nous venons de dire pour la vitesse acquise par le corps, à la fin de la première seconde, dans son mouvement sur le plan incliné, nous pourrions évidemment le répéter pour la vitesse qu'il acquerrait à tout autre instant. Il en résulte que, si deux corps partent du même point A, *fig.* 121, et se meuvent, sous la seule action de leur poids, l'un sur le plan incliné AB, l'autre suivant la verticale AC, les vitesses que le premier corps possédera, lorsqu'il passera aux points D, D′, D″, seront respectivement égales à celles qu'aura le second corps, lorsqu'il passera aux points E, E′, E″, situés sur les mêmes plans horizontaux que les premiers. En sorte qu'on peut conclure généralement de ce qui précède, que la vitesse acquise, à un moment quelconque, par un corps qui descend le long d'un plan incliné, sous la seule action de son poids, n'est autre chose que la vitesse due à la hauteur dont il s'est abaissé verticalement depuis son point de départ (§ 88).

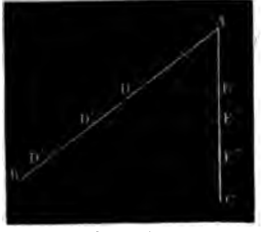


Fig. 121.

Si un corps pesant était lancé le long d'un plan incliné AB, *fig.* 122, et de bas en haut, comme l'indique la flèche, sa vitesse serait retardée par l'action de son poids, dont une composante tendrait à l'empêcher de monter. La diminution de vitesse qu'il éprouverait, en *montant de D en D′, serait précisément* égale à l'augmentation de *vitesse qui lui serait donnée, s'il* parcourait le même chemin en sens

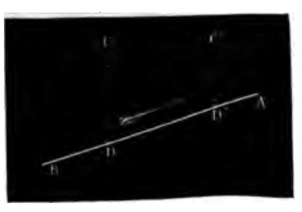


Fig. 122.

contraire. Il en résulte que, si en D il était animé de la vitesse due à la hauteur CD, en D' il n'aurait plus que la vitesse due à la hauteur C'D', les points C et C' étant situés sur une même ligne horizontale.

§ 96. **Mouvement d'un corps pesant sur une ligne courbe.** — Lorsqu'un corps pesant se meut le long d'une ligne courbe, il acquiert, en descendant, successivement différentes vitesses ; nous déterminerons aisément ces vitesses, à l'aide de ce que nous venons de voir. Pour cela nous diviserons d'abord la ligne courbe en plusieurs parties AB, BC, CD,... *fig*. 123, assez petites pour que chacune d'elles puisse être regardée comme une petite ligne droite, et assimilée en conséquence à un plan incliné, sur lequel le corps est obligé de se mouvoir. Si le corps part du point A, il descendra jusqu'en B, et, arrivé en ce point, il sera animé de la vitesse due à la hauteur BM. Il prendra alors la direction BC, et se trouvera dans les mêmes conditions que s'il se mouvait sur le plan incliné RBC, et qu'il fût parti du point R : lorsqu'il arrivera au point C, il sera donc animé de la vitesse due à la hauteur CN. En continuant ainsi à suivre le mouvement du corps, sur les diverses parties dans lesquelles nous avons décomposé la courbe, nous trouverons toujours qu'en un point quelconque, il est animé de la vitesse due à la hauteur verticale du point de départ A au-dessus de ce point.



Fig. 123.

Il nous sera facile, d'après cela, de nous rendre compte des diverses circonstances que présentera le mouvement d'un corps pesant sur une ligne courbe, en raison de la forme de cette ligne. Si le corps se meut sur la ligne ABC, *fig*. 124, et part du point A, il descendra en prenant une vitesse de plus en plus grande, jusqu'à ce qu'il arrive au point le plus bas B ; en ce point, il aura la vitesse due à la hauteur de l'horizontale AC, au-dessus du point B. En vertu de sa

Fig. 124.

il remontera vers le point C ; mais, la pesanteur
ment à ralentir son mouvement, sa vitesse dimi-
›rte que, quand il arrivera en un point E, il n'aura
se qu'il avait précédemment en passant au point D,
veau. Tant qu'il ne sera pas arrivé en C, au niveau
nservera encore une vitesse ascendante; mais, dès
ce point C, sa vitesse sera nulle, la pesanteur le
jusqu'au point B, qu'il dépassera en vertu de sa
il remontera vers le point A, puis redescendra de
contraire, et ainsi de suite indéfiniment. Si le corps
r sur la ligne A B C D E, *fig.* 125, et qu'il partit du



Fig. 125.

ıdrait jusqu'en B, remonterait en C, dépasserait ce
endre en D, puis remonterait jusqu'au point E, si-
point A. Sa vitesse étant devenue nulle en ce point
sante de la pesanteur le ferait descendre en sens
ırcourrait ainsi le chemin E D C B A, pour s'arrêter
, d'où il repartirait pour revenir en E, et ainsi de
ıareil mouvement, la vitesse du corps
ıême, chaque fois qu'il se retrouvera
lan horizontal : ainsi les vitesses qu'il
quatre points M N P Q seront égales



Fig. 126.

e.—Un corps pesant, de petites dimen-
, telle qu'une balle de plomb, suspendu
érieure d'un fil très-délié, dont l'ex-
ıre B est fixe, constitue un *pendule*.
en équilibre lorsque le fil sera verti-
rs son poids sera contrebalancé par
; dans ce cas, ce ne sera autre chose
), dont on se sert pour reconnaître la verticalité
ıne surface plane. Mais, si l'on dérange ce corps

A, et qu'on le place dans la position indiquée par la *fig.* 127, l'é
libre sera rompu ; le poids du corps se décomposera en deux fo
dont l'une, dirigée suivant le
longement du fil, sera dét
tandis que l'autre, dirigée pe
diculairement au fil, tendra
mener le corps vers la p
où il était en équilibre. Le
A, ainsi mis en mouve
restera nécessairement s
cercle dont le centre est
et dont le rayon est BA
mouvra donc conformémen
que nous avons trouvé d
§ 96. Ce corps descendr
le point B, avec une vite
plus en plus grande ; arr

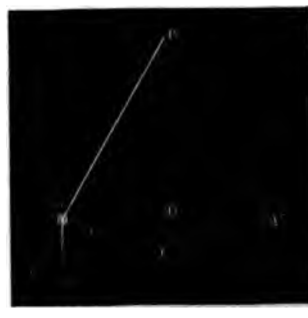


Fig. 127.

ce point, il sera animé de la vitesse due à la hauteur verticale
remontera, en vertu de sa vitesse acquise, jusqu'au point A
au niveau du point A ; puis il redescendra pour revenir au p
et ainsi de suite. Le pendule fera ainsi une série d'oscillation
les positions extrêmes BA et BA', et si aucune cause ext
ne venait altérer ce mouvement, il s'entretiendrait indéfi
Quand on fait l'expérience, ces oscillations successives se
sent bien : mais on remarque bientôt que l'angle ABA'
par les positions extrêmes du pendule, angle qu'on nomme l
tude des oscillations, va en diminuant progressivement, e
bout d'un certain temps cet angle devient nul ; en sorte que
dule revient à l'état d'équilibre. Cette diminution progres
l'amplitude des oscillations tient à la résistance que l'air opp
mouvement du pendule, et aussi aux résistances qui se pro
toujours à son point de suspension, de quelque manière qu'on é
cette suspension.

§ 98. Le temps que le pendule emploie à aller de la posit
à la position opposée BA', est ce que l'on nomme la durée
oscillation. Ce temps varie, lorsque l'amplitude change ;
l'amplitude est petite, les changements qu'elle éprouve n'i
pas d'une manière sensible sur la durée des oscillations. Dés
par *l* la longueur du pendule exprimée en mètres : par π le r
de la circonférence d'un cercle à son diamètre, rapport qui es
près égal à $3\frac{1}{7}$, ou plus exactement $\frac{355}{113}$; par g le nombre 9
comme précédemment, et par t la durée d'une petite os

[redacted]

les. La mécanique rationnelle apprend que cette oscillation est donnée par la formule

$$t = \pi \sqrt{\frac{l}{g}}.$$

ontre que, si la longueur du pendule varie, la durée rie comme la racine carrée de cette longueur ; en voir des pendules dont les durées d'oscillations omme les nombres 1, 2, 3, il faut leur donner des ionnelles aux nombres 1, 4, 9. On peut vérifier ntalement de la manière suivante. On prend deux n est quatre fois plus long que l'autre, et on les nt l'autre, en deux points situés sur une même Si l'on écarte ces deux pendules de leur position nême côté, et d'une même quantité, comme le puis qu'on les abandonne en même temps à eux-ont successivement les positions relatives repré- 129, 130, 131. Après une oscillation entière du

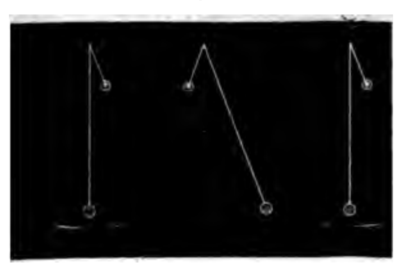


Fig. 129. Fig. 130. Fig. 131.

rand n'aura fait qu'une demi-oscillation, *fig.* 129 ; -ci achèvera son oscillation, l'autre reviendra au *g.* 130. Lorsque le plus grand des deux aura fait oscillation en sens contraire, le petit achèvera une on, *fig.* 131 ; et enfin lorsque le grand pendule remière position, le petit y sera également revenu, etrouveront comme au commencement du mouve- n voit par là que, pendant que le grand pendule n, le petit en fait deux.

le qui donne la *durée* des petites oscillations d'un *en mécanique rationnelle*, en supposant que le fil *t que le corps* suspendu à son extrémité se ré-

duit à un point matériel : ce pendule idéal est ce que l'on nomme un *pendule simple*. La lettre *l*, employée dans la formule, désigne la longueur du fil, comptée depuis son point d'attache jusqu'au point matériel qui le termine.

Lorsqu'un pendule est formé d'un fil matériel à l'extrémité duquel est attaché un corps pesant, quelque délié que soit le fil, quelque petit que soit le corps, ce n'est plus un pendule simple. Les pendules qui servent à régulariser le mouvement des horloges, et qui se composent d'une tige métallique terminée par un corps lenticulaire, sont encore plus loin du pendule idéal dont nous venons de parler. De pareils pendules sont désignés, par opposition, sous le nom de *pendules composés*.

Dans les oscillations d'un pendule composé, toutes les molécules dont il est formé oscillent de la même manière ; la durée de l'oscillation de chacune d'elles est la même que celle de toutes les autres. Cependant, si ces molécules étaient liées isolément au point de suspension par des fils flexibles non pesants, et que chacune pût osciller indépendamment des autres, elles formeraient autant de pendules simples de diverses longueurs, et leurs oscillations n'auraient pas la même durée : celles qui seraient plus rapprochées du point de suspension iraient plus vite, les autres iraient plus lentement. On voit donc que, lorsque toutes les molécules sont liées entre elles, et constituent ainsi le pendule composé, pour qu'elles oscillent toutes de même, il faut que le mouvement des unes soit ralenti, et celui des autres accéléré par leur dépendance mutuelle. Entre les premières et les dernières, il doit y avoir certaines molécules dont le mouvement n'est ni ralenti, ni accéléré, et qui oscillent de la même manière que si elles étaient seules. La distance d'une quelconque de ces molécules au point de suspension est ce que l'on nomme *la longueur du pendule ;* c'est la longueur du pendule simple équivalent au pendule composé, relativement à la durée des oscillations.

La mécanique rationnelle enseigne à trouver cette longueur, quelle que soit la figure du pendule composé, et de quelque matière que ses diverses parties soient formées. Dans le cas où le pendule est formé d'une balle de plomb suspendue à l'extrémité d'un fil délié, la longueur du pendule simple qui lui est équivalent ne diffère que d'une quantité insignifiante de la distance du point de suspension au centre de la balle ; c'est donc cette distance qu'on devra prendre pour la longueur du pendule, lorsqu'on voudra se servir de la formule qui donne la durée d'une petite oscillation.

§ 100. Si l'on cherche, par l'expérience, la durée d'une oscillation *d'un pendule, en comptant*, par exemple, le nombre d'oscillations

...'il effectue en une minute ou 60 secondes, et divisant 60 par ce ...mbre d'oscillations ; et si, en outre, on détermine la longueur du ...dule simple équivalent, on pourra, à l'aide de ces données, trou...er très exactement la valeur du nombre que nous avons désigné ...ar g. En effet, si l'on prend la formule écrite précédemment au ...98, qu'on élève au carré les deux membres de l'égalité, et qu'on ...solve ensuite par rapport à g, on trouvera

$$g = \frac{\pi^2 l}{t^2}.$$

...e qui permettra de calculer la valeur de g, puisqu'on connait les ...aleurs de π, de l et de t. C'est ainsi qu'on a trouvé que g est égal ... 9^m,8088, comme nous l'avons annoncé au § 88.

La même formule peut encore se mettre sous cette autre forme :

$$l = \frac{g t^2}{\pi^2}.$$

...n pourra s'en servir pour trouver la longueur d'un pendule dont les os...llations aient une durée connue. Si l'on veut connaître, par exemple, ... longueur du pendule à secondes, c'est-à-dire du pendule dont cha...ue oscillation a une durée d'une seconde, on remplacera t par 1, g ...ar 9,8088, π par $\frac{355}{113}$, et on trouvera 0^m,994 pour cette longueur.

Cette longueur du pendule à secondes doit rester gravée dans la ...émoire, afin qu'on puisse s'en servir au besoin. Il est, en effet, très ...cile de construire un pareil pendule, partout où l'on se trouve, en ...tachant une balle de plomb ou une bille à l'extrémité d'un fil délié, ... suspendant ce fil de manière que la distance du point de suspen...on au centre de la balle ou de la bille soit de 0^m,994. A l'aide de ...e pendule, qu'on fera osciller, on pourra mesurer très exactement ... durée d'un phénomène, lorsque cette durée ne sera pas très ...ngue. On pourra s'en servir, par exemple, pour compter le nom...re de secondes qu'une pierre emploie à tomber de l'orifice d'un ...uits jusqu'à son fond, afin d'en déduire la profondeur du puits. Si ...on voulait un pendule qui fît chaque oscillation en une demi-se...onde, il faudrait lui donner une longueur quatre fois plus petite, ...est-à-dire de 0^m,248.

§ 101. **Mouvement de l'escarpolette.** — L'escarpolette con...ste en un siége suspendu à des cordes, sur lequel on se place pour se ...alancer dans l'air. Les cordes, au nombre de deux ou de quatre, sont ...tachées en deux points fixes, situés sur une même ligne horizon...ale. Quand l'escarpolette est mise en mouvement, elle tourne au...our de *cette ligne horizontale, comme* autour d'un axe, et constitue ...*si un véritable pendule. Si l'on* n'entretient pas le mouve-

ment, les oscillations successives ont des amplitudes de plus petites, et elles finissent, au bout de quelque temps, paraître tout à fait, ainsi que nous l'avons dit dans le § 1

Il arrive cependant que, lorsqu'une personne, placée d l'escarpolette, imprime certains mouvements à son corps tude des oscillations va en augmentant, et que, tout en très faible d'abord, cette amplitude peut devenir très gra l'explication de ce fait que nous allons donner.

Imaginons qu'un pendule AB, *fig.* 132, formé d'un p A, et d'un fil très-délié, disposé de telle manié lorsqu'il descend vers la BC, il conserve toujours longueur AB; tandis que l'aura dépassée, et qu'i tera de l'autre côté, sa devienne brusquement p et se réduise à BD. une oscillation entière, l décrira d'abord l'arc de en descendant; arrivé remontera brusquement enfin il achèvera l'oscillation en se mouvant sur l'arc de

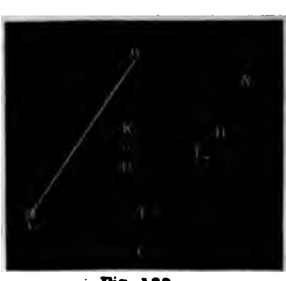


Fig. 132.

Il est facile de reconnaître que, dans ce cas, la demi- ascendante devra avoir une amplitude plus grande qu oscillation descendante qui la précède. Le corps A, au mo arrive en C, est animé de la vitesse due à la hauteur CF, est dirigée horizontalement; en se transportant brusque en D, il conserve la même vitesse horizontale, et c'est cette vitesse qu'il monte le long du cercle DN; il devra d ver sur ce cercle jusqu'en un point H, dont la hauteur DK, du point D, soit égale à CF; en sorte que, à la fin de la d lation ascendante, le pendule prendra la direction BH. Or de voir que l'angle CBH est plus grand que l'angle AB exemple, BD était la moitié de BC, il faudrait prendre la moitié de CF, pour que le point E, situé au niveau d déterminât un angle CBE, égal à ABC; et puisque DK CF, il s'ensuit que le point H est plus haut que le point conséquence, que l'angle CBH est plus grand que l'a

Admettons encore que le pendule, en partant de la dir *pour recommencer* une autre oscillation, reprenne sa lo *mitive AB; puis,* qu'il se raccourcisse de nouveau, a

[redacted]

chevé sa demi-oscillation descendante; la même raison fera
mplitude de la demi-oscillation ascendante sera plus grande
ngle CBH.

le pendule
eà se mou-
si, en s'al-
t lorsqu'il
oche de la
, et se rac-
ant lors-
n éloigne,
de des os-
s ira tou-
augmen-

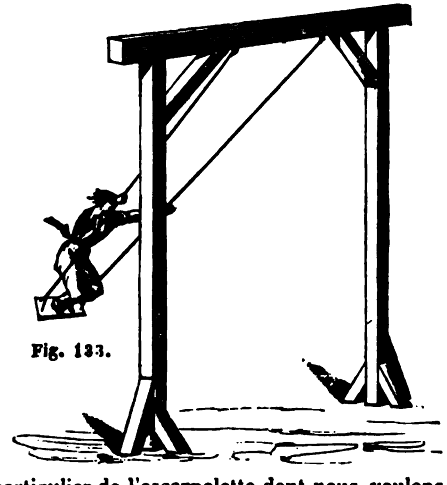


Fig. 133.

irconstan-
s lesquel-
venons de
ouvoir un
se réali-
peu près
nouvement particulier de l'escarpolette dont nous voulons
dre comp-
omme qui
t debout
balancer,
cherche à
ter l'am-
les oscilla-
r les mou-
de son
e baisse et
ve alter-
ent. Il se
t prend la
indiquée
. 133, au
de cha-
ni-oscilla-
cendante;
élève, au
, à chaque demi-oscillation ascendante, et prend la po-

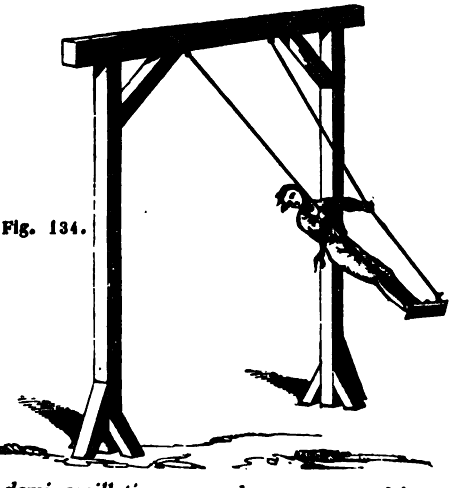


Fig. 134.

sition représentée par la *fig.* 134. Dans le premier cas, une portion de son corps s'éloigne des points d'attache de l'escarpolette; dans le second cas, elle s'en rapproche. Il existe évidemment une grande analogie avec ce que nous avions supposé dans notre pendule, et le résultat doit être le même, c'est-à-dire que l'amplitude des oscillations doit aller constamment en augmentant.

§ 102. **Mouvement curviligne d'un corps entièrement libre.**—Lorsqu'un corps a été lancé dans l'espace avec une certaine vitesse, si aucune force ne venait agir sur lui pour modifier son mouvement, il se mouvrait uniformément et en ligne droite. Mais, dès le moment que ce corps sera soumis à l'action continue d'une force, son mouvement ne restera pas à la fois rectiligne et uniforme.

Si la force agit constamment suivant la direction du mouvement primitif du corps, elle ne changera pas la direction du mouvement, et ne fera que modifier la vitesse, en l'augmentant ou la diminuant, suivant qu'elle agira dans le sens du mouvement ou en sens contraire : le mouvement restera rectiligne, mais il ne sera plus uniforme. Ce cas se présente, par exemple, lorsqu'un corps pesant se meut suivant une ligne verticale, soit qu'on l'ait laissé tomber sans lui imprimer de vitesse, soit qu'on l'ait lancé de bas en haut.

Mais lorsque la force appliquée au corps n'agira pas suivant la direction de son mouvement, elle tendra à le détourner de sa route : elle l'en déviera en effet, à chaque instant, de plus en plus, et lui fera décrire une ligne courbe : le mouvement deviendra curviligne. On en a un exemple dans le mouvement d'un corps pesant lancé suivant une direction oblique : on voit ce corps monter, puis descendre, en décrivant une ligne courbe, parce que l'action de la pesanteur change à chaque instant la direction du mouvement que possède le corps Nous reviendrons dans un instant sur cet exemple du mouvement curviligne.

Nous ne pourrons nous rendre complétement compte de la manière dont le mouvement d'un corps est rendu curviligne, par l'action incessante d'une force non dirigée suivant le mouvement, que lorsque nous saurons composer entre elles deux vitesses dont un corps se trouve animé simultanément. C'est ce dont nous allons nous occuper d'abord.

§ 103. **Composition des vitesses.** — Il peut paraître difficile, au premier abord, de concevoir qu'un corps soit animé, à la fois, de deux vitesses : l'exemple suivant lèvera toute incertitude à cet égard. Imaginons qu'un bateau se meuve uniformément, et en ligne droite, le long d'une rivière : une bille posée sur le pont, en un point A, *fig. 135*, participe au mouvement du bateau, et sans se déplacer

sur le pont, elle se meut uniformément suivant la ligne droite A B. Si l'on vient à lancer cette bille de manière à la faire rouler unifor-

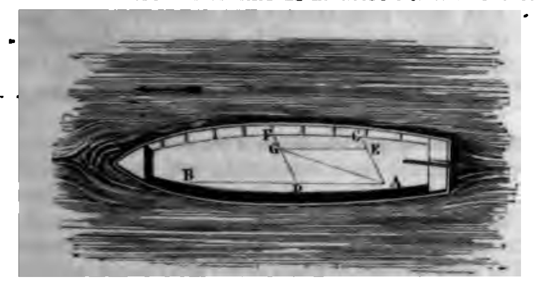


Fig. 135.

mément sur le pont, suivant la ligne AC, elle se trouvera animée de deux mouvements à la fois : 1° du mouvement du bateau ; 2° de son mouvement par rapport au bateau.

Soit AD le chemin que la bille parcourrait en une seconde, en vertu du premier mouvement seul, c'est-à-dire la vitesse de ce premier mouvement, vitesse qui est la même que celle du bateau ; soit de plus AE la vitesse de la bille, dans son mouvement de roulement sur le pont. Au bout d'une seconde, le bateau se sera avancé d'une quantité égale à AD ; la ligne AC, sur laquelle la bille roule, et qu'on peut supposer tracée sur le pont, se sera transportée parallèlement à elle-même dans la position DF. Mais, en même temps, la bille aura marché sur cette ligne d'une quantité égale à AE, et, comme le point E se sera transporté en G, en décrivant EG parallèle à AD, la bille se trouvera en G, à la fin de la seconde que nous considérons.

La bille était au point A au commencement de cette seconde, et elle est au point G à la fin : or, il est aisé de voir que, pendant toute la durée de cette seconde, elle n'a pas cessé de se trouver sur la ligne AG, et qu'elle l'a parcourue d'un mouvement uniforme. Si l'on cherchait, en effet, par le raisonnement qu'on vient de faire, où était la bille après une demi-seconde, un quart de seconde, on trouverait qu'elle était située sur la ligne AG, à la moitié, au quart de cette ligne, à partir du point A. Donc, en définitive, la bille, animée simultanément d'une vitesse AD, et d'une autre vitesse AE, dont les directions sont différentes, *se trouve* avoir une vitesse unique, *représentée en grandeur et en direction* par la diagonale du parallélogramme *construit sur les vitesses* AD et AE.

On remarquera l'analogie qui existe entre la composition des vitesses dont un même corps est animé, et la composition des forces appliquées à un même point suivant des directions différentes. En raison de cette analogie, on emploie les expressions de composantes et de résultante pour les vitesses, aussi bien que pour les forces : AD et AE sont les vitesses composantes ; AG est la vitesse résultante.

§ 104. **Mouvement parabolique d'un corps pesant.** —Lorsqu'un corps pesant est lancé horizontalement, quelque grande que soit sa vitesse, il ne continue pas à se mouvoir suivant une ligne horizontale : la pesanteur l'abaisse de plus en plus au-dessous de cette ligne, et lui donne ainsi un mouvement curviligne. Pour étudier plus facilement la manière dont se produit le changement continuel de direction du mouvement, nous imaginerons que la pesanteur, au lieu d'agir sans interruption, n'exerce son action sur le corps que d'une manière intermittente : nous supposerons, par exemple, que la durée totale du mouvement étant divisée en quarts de seconde, la pesanteur agisse brusquement au commencement de chacun de ces petits intervalles de temps, puis qu'elle cesse d'agir, pour recommencer au commencement de l'intervalle de temps suivant.

Dans cette hypothèse, le corps lancé horizontalement suivant la ligne AM, *fig.* 136, ne reste sur cette ligne que pendant un quart



Fig. 136.

de seconde. Au bout de ce temps, arrivé en B, il reçoit une impulsion de la pesanteur, qui lui imprime une vitesse verticale BB′; cette vitesse se compose avec la vitesse BB″ qu'il possédait, et il en résulte une vitesse BB‴. Le corps se meut pendant un quart de seconde suivant la ligne BB‴, et arrivé en C, au quart de cette ligne, il reçoit une nouvelle impulsion de la pesanteur. Si l'on imagine que la vitesse qu'il possédait, en arrivant en ce point, soit décomposée en deux composantes C*c* et CC″, égales et parallèles aux composantes BB′, BB″, la vitesse que lui communiquera la pesanteur, par son action instantanée au point C, s'ajoutera à la *composante Cc*, pour former une vitesse verticale double CC′, et, *après cette seconde* action de la pesanteur, le corps sera animé

tesse CC''', résultante des vitesses CC' et CC''. De même, n nouveau quart de seconde, le corps ayant parcouru le e CC''', et étant arrivé en D, pourra être regardé comme le deux vitesses Dd, DD'', égales et parallèles aux com- s CC', CC'' : la pesanteur agissant de nouveau, lui don- ıcore, dans le sens vertical, le même accroissement de en sorte que la composante Dd, double de BB', sera rem- par la vitesse DD', triple de BB', et le corps se trouvera le la vitesse DD''', résultante des composantes DD', DD''. ouvra pendant un quart de seconde suivant cette ligne, de , puis la pesanteur changera encore la grandeur et la direc- sa vitesse, et ainsi de suite indéfiniment. On voit donc que, ypothèse où nous nous sommes placés, le corps décrira le ıe ABCDE.

eu de supposer que la pesanteur agit à des intervalles d'un le seconde, on pourrait admettre que c'est après chaque de seconde qu'elle donne une nouvelle impulsion au corps, riverait à un résultat analogue, si ce n'est que les côtés du e décrit par le corps seraient plus petits et plus nombreux, e même durée totale de mouvement. Enfin, si l'on revient à é, on verra que la pesanteur, agissant sans cesse, fera dé- corps, non plus un polygone, mais une ligne courbe. De l'on décompose à chaque instant la vitesse du corps en une ınte horizontale et une composante verticale, on trouvera que osante horizontale est toujours égale à la vitesse qu'on avait le au corps en le lançant; tandis que la composante verti- st autre chose que la vitesse qui lui aurait été communiquée esanteur, s'il était tombé depuis le commencement du mou- sous la seule action de cette force, et sans qu'on l'ait lancé.

ısulte de là que, pour résenter le mouve- un corps qui a été ırizontalement à par- point A, *fig.* 137, ıe certaine vitesse, suivant AM, on concevoir que ce tombe verticalement de la ligne AN, tesse initiale, et que

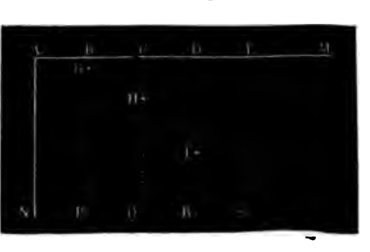


Fig. 137.

ne soit transportée parallèlement à elle-même, ainsi que *qui la décrit, avec une* vitesse horizontale dirigée sui-

11.

vant AM, et égale à la vitesse de projection dont on vient de parler. Au bout d'une seconde, la ligne AN vient prendre la position BP; mais en même temps le corps est tombé sur cette ligne d'une quantité BG : il se trouve donc alors au point G. Au bout de deux secondes, la ligne AN se place en CQ; mais le corps a parcouru sur cette ligne une distance CH, quatre fois plus grande que BG : il est donc en H, à la fin de la deuxième seconde. On verra de même que si, sur la position DR, que prend la ligne AN après trois secondes, on porte une longueur DI égale à neuf fois BG, on aura en I la position qu'occupera le corps à cet instant; et en continuant ainsi on trouvera les positions du corps après 4, 5, 6..., secondes. On pourra d'ailleurs trouver, tout aussi facilement, des positions intermédiaires de ce corps, telles que celles qu'il prendra, par exemple, après $\frac{1}{2}$ seconde, 1 seconde et demie, 2 secondes et demie..., de mouvement; en sorte qu'on sera en mesure de tracer la ligne courbe qu'il décrit. Cette ligne courbe se nomme, en géométrie, une *parabole* : sa forme dépendra de la grandeur de la vitesse avec laquelle le corps aura été lancé horizontalement. Les *fig.* 138, 139, 140 représentent les paraboles décrites par des corps lancés avec des vitesses horizontales, qui sont entre elles comme les nombres 1, 2 et 3.


Fig. 138. Fig. 139. Fig. 140.

On peut vérifier par l'expérience qu'un corps, lancé horizontalement, et soumis ensuite à la seule action de la pesanteur, décrit bien une parabole, conformément à ce que nous venons de voir. A cet effet, on se sert de l'appareil représenté par la *fig.* 141. Cet appareil consiste en un tableau de bois, sur lequel on a tracé plusieurs paraboles, partant d'un même point A, et représentant les chemins que doit parcourir un corps lancé horizontalement de ce point, avec des vitesses différentes; à côté du point A se trouve un morceau de bois B, qui fait saillie sur le tableau, et dont la face courbe présente une rainure longitudinale : cette rainure est disposée de telle manière qu'une bille qui la suit, en roulant sous l'action de la pesanteur, arrive au bas avec une vitesse horizontale, et que le centre de cette bille est au niveau du point A, au moment où elle

[redacted]

En laissant rouler la bille successivement à partir de cette rainure, elle acquerra, en arrivant au esses horizontales; et, tâtonnement, viendra à la vitesse coure une tracées sur s'assurer plus comme suit bien te parabole en plusieurs courbe, vis dans peut passer puis, en er d'une

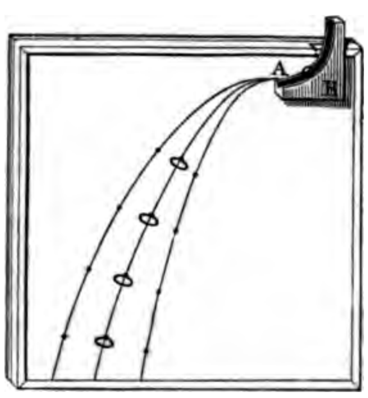


Fig. 141.

ible sur la rainure, on la verra traverser tous ces . 141 montre les anneaux disposés le long d'une es qui y sont tracées; on aperçoit le long des deux dans lesquels on les fixera, pour faire l'expérience bille des vitesses initiales différentes.

B, *fig.* 142, la parabole que décrit un corps pe- izontalement au point A, dans he *f*. Si, à chaque instant de on décompose sa vitesse en s, l'une horizontale et l'autre uvera, ainsi que nous l'avons iposante horizontale reste tou- et que la composante verti- proportionnellement au temps : orsqu'il sera arrivé en B, il e vitesse résultant de la com-



Fig. 142.

esse horizontale qui lui a été imprimée au point A, erticale que la pesanteur lui a donnée pendant son mouvement.

ensuite le corps soit lancé, à partir du point B, u'il avait acquise en arrivant à ce point, mais en *mme l'indique la flèche f'*. La pesanteur diminuera *a composante* verticale de cette vitesse d'impul-

sion, de la même manière qu'elle avait augmenté la vitesse verticale du corps, lorsqu'il avait été lancé dans le sens de la flèche *f*; d'ailleurs la composante horizontale ne sera pas modifiée : en sorte que le corps reprendra successivement, mais dans un ordre inverse, des vitesses égales et contraires à celles qu'il avait eues précédemment. Il en résulte nécessairement que le corps repassera, en montant, par le chemin qu'il avait parcouru en descendant, c'est-à-dire qu'il décrira la même parabole AB, en allant de B vers A; et, arrivé au point A, il sera animé précisément de la vitesse horizontale, avec laquelle on l'avait d'abord lancé de ce point.

Nous sommes maintenant en mesure de voir quel mouvement prendra un corps pesant, lancé obliquement suivant une direction telle que AB, *fig.* 143. Ce corps décrira d'abord, en montant, un arc AC de parabole; puis, arrivé au point C, où son mouvement sera dirigé horizontalement, il se trouvera dans les mêmes conditions que s'il était lancé de ce point, dans la direction CD, c'est-à-dire qu'il parcourra un nouvel arc CF de parabole. Les deux arcs AC et CF présentent une symétrie complète par rapport à la verticale qui passe par le point le plus haut C; le chemin ACF parcouru par le corps n'est qu'une portion de la parabole complète et indéfinie MCN.



Fig. 143.

§ 106. La figure de la parabole, que décrit un corps pesant lancé obliquement, dépend à la fois de la grandeur et de la direction de la vitesse qui lui a été imprimée. Si l'on fait varier seulement la direction de cette vitesse, sans changer sa grandeur, qu'on suppose par exemple que le corps soit lancé toujours de la même manière, et successivement, suivant les directions AB, AC, AD, AE, *fig.* 144, on lui verra décrire les différentes paraboles AB′, AC′, AD′, AE′. La première de ces paraboles s'abaisse immédiatement au-dessous de la ligne horizontale AB; tandis que les autres, après s'être élevées au-dessus de cette ligne, viennent la rencontrer en des points G, H, K, inégalement éloignés du point A.

Chacune des distances AG, AH, AK se nomme l'*amplitude du jet correspondant*. L'amplitude du jet varie donc avec la *direction de la vitesse initiale* qui a été imprimée au mobile. L'étude complète

[redacted]

ı montre que, si la direction de la vitesse initiale
it angle CAB, *fig.* 144, avec la ligne horizontale,



Fig. 144.

jet sera petite; que, si cette direction se relève de
ıu-dessus de l'horizon, l'amplitude du jet augmentera
u'à ce que la vitesse initiale fasse avec l'horizon un
al à 45°: que, si la direction de la vitesse initiale se
vantage de la verticale AF, l'amplitude du jet dimi-
ıfin elle devient tout à fait nulle, lorsque la vitesse
st dirigée suivant AF. C'est donc sous un angle de
ɔrizon, que le corps devra être lancé, pour que, à éga-
e, l'amplitude du jet atteigne sa plus grande valeur.
n outre, que cette plus grande valeur AH est le double
r AF, à laquelle le corps se serait élevé, s'il avait été
lement, et de bas en haut, avec la même vitesse.
ns le tir des projectiles, lorsqu'on veut atteindre un but
n ne doit pas lancer le mobile suivant la ligne droite qui
but. On voit, d'après ce qui précède, qu'on doit tou-
son mouvement initial au-dessus de cette ligne droite,
isse atteindre le but, en décrivant la parabole que la
i fait nécessairement décrire. C'est ce qu'on a toujours
ver dans le tir du canon, et l'adresse de l'artilleur con-
alement à donner au canon une inclinaison convena-
ır compte de la déviation que le mouvement du boulet
ar suite de l'action de la pesanteur.
du fusil, on dirige le canon au moyen de deux points

de repère placés vers ses deux extrémités. On juge qu'il a bien la direction convenable, lorsque le rayon visuel qui passe par ces deux points A, B, *fig.* 145, va aboutir au but qu'on veut atteindre. Cette

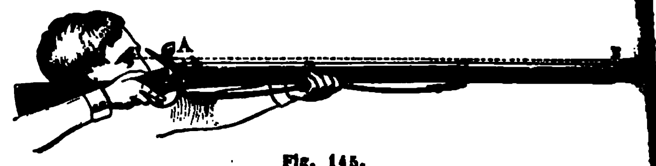


Fig. 145.

ligne de visée se trouvant parallèle à l'axe du canon, si le projectile part exactement suivant cet axe, il devra nécessairement arriver un peu au-dessous du but; mais la déviation que la pesanteur lui fait ainsi éprouver est très peu de chose, en raison de la grandeur de sa vitesse relativement à la distance qu'il a ordinairement à parcourir.

Cependant, dans les fusils perfectionnés, tels que ceux dont sont armés les chasseurs de Vincennes, et à l'aide desquels on peut atteindre à une distance très grande, on a rendu mobile le point de repère qui est le plus rapproché de l'œil; on peut élever ou abaisser à volonté ce point de repère, suivant que le but à atteindre est plus ou moins éloigné. De cette manière, en visant le but à l'aide du repère fixe B, *fig.* 146, et du repère mobile A, qu'on a suffisamment

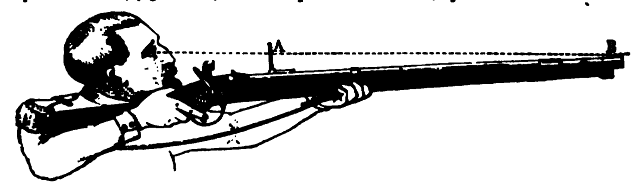


Fig. 146.

éloigné du canon, la balle part suivant une direction oblique par rapport à la ligne AB, elle décrit sa parabole, et peut ainsi arriver au point qu'on veut atteindre.

§ 108. **Mouvement des corps célestes.** — L'astronomie nous enseigne que la terre et les autres planètes sont des corps isolés, libres, qui circulent autour du soleil, en décrivant des courbes fermées qui approchent beaucoup d'être des cercles: de même, la lune décrit à peu près un cercle autour de la terre. Il va nous être facile de nous rendre compte de la manière dont se produisent ces mouvements curvilignes.

[redacted]

Si la terre, à un moment donné, était soustraite à l'action de toute force extérieure, elle se mouvrait uniformément et en ligne droite, en raison de la vitesse qu'elle posséderait dans ce moment. Puisqu'elle se meut en ligne courbe, il faut qu'elle soit soumise à l'action d'une force qui la dérange, à chaque instant, du mouvement rectiligne qu'elle tend à prendre en vertu de son inertie. Newton a démontré que cette force est dirigée vers le centre du soleil, comme l'indique la flèche tracée sur la *fig.* 147, où S est le soleil et T la terre; en sorte que les choses se passent comme si le soleil attirait la terre. Il a démontré de plus que la grandeur de cette force de gravitation varie en raison inverse du carré de la distance de la terre au soleil. Sous l'action d'une pareille force, la terre tend à tomber vers le soleil, de même qu'une pierre, soumise à la pesanteur, tombe sur le sol : la terre tomberait en effet sur le soleil, si elle n'avait pas de vitesse initiale, ou bien si sa vitesse était dirigée suivant la ligne TS. Mais la vitesse qu'elle possède, suivant la tangente TA à la ligne courbe qu'elle vient de décrire, l'empêche de tomber ainsi : elle se trouve dans les mêmes conditions qu'un corps pesant qu'on lance suivant une direction horizontale, ou presque horizontale. Si elle ne décrit pas comme lui une parabole, cela tient à ce que, à mesure qu'elle se déplace, la force qui agit sur elle, passant toujours par le centre du soleil, change constamment de direction; tandis que, dans le cas d'un corps pesant qu'on lance à la surface de la terre, on regarde la pesanteur comme agissant sur lui toujours dans la même direction, à cause de la petitesse du chemin que parcourt ce corps relativement aux dimensions de la terre. Il est vrai que, quelle que soit la vitesse avec laquelle on lance un corps pesant, on le voit toujours tomber sur la terre au bout de quelque temps; et, en raison de l'analogie que nous établissons entre le mouvement de ce corps et le mouvement de la terre autour du soleil, il semble que nous soyons conduits à en conclure, contrairement à ce que l'on observe, que la terre doit finir par tomber sur le soleil : mais on va voir qu'il n'en est pas ainsi.



Fig. 147.

Si un boulet de canon est lancé horizontalement avec des vitesses de plus en plus grandes, il va tomber sur la terre, en des points de plus en plus éloignés, et la parabole qu'il décrit a une courbure de moins en moins prononcée. Ce boulet rencontrerait toujours la surface de la terre, *quelque grande que soit* sa vitesse de projection,

si cette surface était un plan, comme le montre la *fig.*
surface de
courbe, puis
peu près la
sphère : le b
bera donc su
tant que la
ou AC, ou
que la pesa



Fig. 148.

décrire, sera plus courbée que la surface de la terr
ment que sa vitesse de projection sera assez grande p
rabole AE qu'il
pas plus courbée
de la terre, il ne to
cette surface. Dan
le boulet se transp
de son point de d
plus permis de su
pesanteur agit su
directions parallè



Fig. 149.

séquence il ne décrira plus une parabole. Il doi
comme étant soumis à l'action d'une force dont la
toujours par le centre de la terre ; lorsqu'il aura déc
sans se rapprocher de la terre, il se trouvera donc e
les mêmes conditions qu'au commencement de so
il continuera à se mouvoir de la même manière, et
indéfiniment autour de la surface de la terre, sans
contrer, à moins qu'une cause extérieure, telle qu
de l'air, ne vienne diminuer sa vitesse. Pour qu'u
horizontalement se meuve, comme nous venons de
tomber sur le sol, et constitue ainsi une espèce de
terre, comme la lune, il faudrait lui imprimer une v
moins de 8000 mètres par seconde.

La terre, dans son mouvement autour du soleil,
cisément dans le cas du boulet dont nous venons
vitesse qu'elle possède, à un moment quelconque, es
pour lui faire décrire à peu près un cercle autour d
est de même des autres planètes, dans leur mouver
soleil, et de la lune dans son mouvement autour de

§ 109. **Mouvement circulaire, force centri**
qu'on fait tourner rapidement un corps A, *fig.* 150, at
extrémités d'une corde AB, dont l'autre extrémit

[redacted]

e se tend, et elle pourrait même se rompre, si le mouvement de ion était assez rapide. Cela provient de ce que le corps tend, à ne instant, à se mouvoir en ligne droite, suivant la direction du ement qu'il avait dans l'instant précédent : la corde ne peut l'obliger à se mouvoir suivant une iférence de cercle, qu'en exerçant sur lui une force de traction dirigée vers le centre; le corps réagit, et c'est cette réaction qui détermine la tension de la corde. Pendant que le corps tourne, il agit sur la corde de la même manière que s'il était soumis à l'action d'une force qui tendrait à l'éloigner du centre de son mouvement : cette force se nomme la *force centrifuge*.



Fig. 150.

La force centrifuge est développée par l'obligation dans laquelle se trouve le corps de décrire une circonférence de cercle : aussitôt que cette obligation cesse, la force centrifuge est anéantie. Si, par exemple, pendant le mouvement de rotation, on vient à couper la corde, le corps se mouvra suivant la tangente AC, menée par le point du cercle où il était lorsqu'on l'a rendu libre; son mouvement ne sera que la continuation de celui qu'il avait au moment où l'on a coupé la corde, et ne sera modifié en aucune manière par la force centrifuge qui a cessé d'exister à ce moment même. La force centrifuge détermine donc la tension de la corde, elle peut même occasionner sa rupture : mais elle n'agit plus dès que le corps a cessé d'être obligé de décrire le cercle.

La fronde, qui sert à lancer des pierres, consiste, comme on sait, en un morceau de toile ou de peau, auquel sont attachées deux petites cordes, *fig.* 151. On place une pierre, comme la figure l'indique, on saisit les extrémités des deux cordes, et l'on imprime à la fronde un mouvement rapide de rotation autour de la main. Pendant ce mouvement, les cordons sont tendus par la *force centrifuge*; et si, à un moment donné, on abandonne *un de ces deux cordons*, la pierre, rendue libre, ne décrit plus

151.

la circonférence qu'elle décrivait précédemment : elle part suivant la tangente à cette circonférence, menée par le point où elle se trouvait lorsqu'elle a cessé d'être retenue par la fronde. L'adresse de celui qui se sert de cet instrument consiste à abandonner la pierre en un point convenable A, *fig.* 152, pour que, partant de ce point suivant la tangente au cercle, puis décrivant une parabole sous l'action de la pesanteur, elle puisse arriver au point B que l'on veut atteindre.



Fig. 152.

§ 140. La force centrifuge qui se développe dans un mouvement de rotation peut être rendue sensible à l'aide des expériences suivantes.

La *fig.* 153 représente un appareil ABC, supporté par un pied solide en bois, et qui peut tourner horizontalement sur ce pied : en tirant une corde qui fait plusieurs tours sur la partie cylindrique A, on peut donner à l'appareil un mouvement rapide de rotation. Entre les deux points B et C se trouve un fil métallique bien tendu, le long duquel peuvent se mouvoir deux billes d'ivoire D, E, traversées par ce fil. La bille D étant placée comme l'indique la figure, si l'on vient à faire tourner rapidement l'appareil, on la voit s'éloigner du centre du mouvement, et se transporter à l'extrémité B du fil métallique. La bille E, se trouvant dans des conditions semblables, tend aussi à se transporter en C; mais elle en est empêchée par un ressort en hélice, qui a été disposé tout autour du fil. La bille E

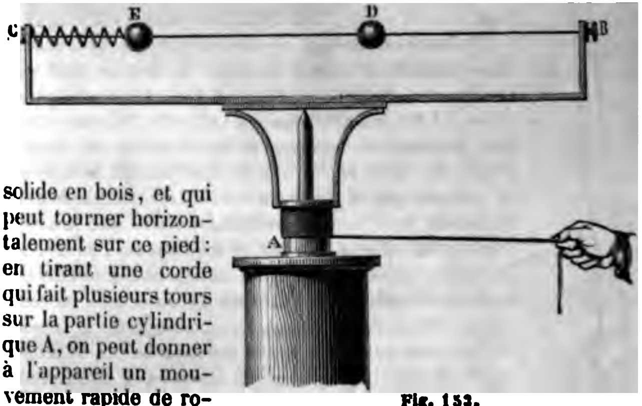


Fig. 153.

loigne cependant du centre de son mouvement; elle comprime le sort, et la tension qu'elle lui communique ainsi peut servir mesure à la force centrifuge développée par le mouvement de tation.

La *fig*. 154 représente un autre appareil qui se monte sur le même

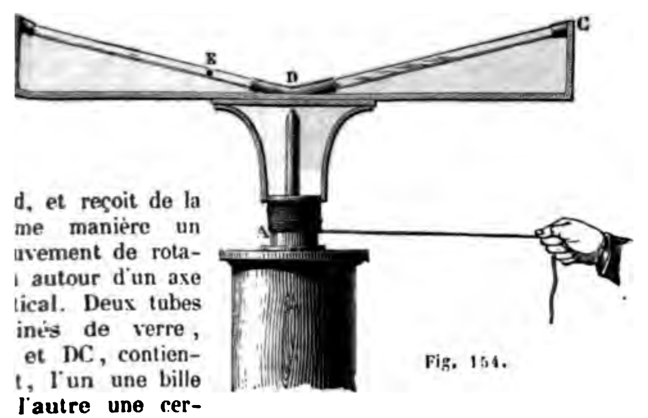


Fig. 154.

d, et reçoit de la me manière un uvement de rotation autour d'un axe tical. Deux tubes inés de verre, et DC, contient, l'un une bille l'autre une certaine quantité d'eau. Lorsqu'on fait tourner rapidement ces deux es, on voit la bille et l'eau monter vers leurs extrémités supéres B, C. Pour nous rendre compte de la manière dont se pro- ce mouvement ascendant, examinons ce qui arriverait si, dant la rotation de l'appareil, la bille se trouvait en un point lconque du tube qui la contient. Cette bille est soumise à tion de son poids, qui est force verticale EF, *fig*. 5, et, en outre, à l'action la force centrifuge EG, est dirigée de manière à oigner de l'axe de rota- ; elle est donc dans les mes conditions que si elle it soumise à l'action de force unique EH, résulte des deux forces prélentes. Si cette force EH

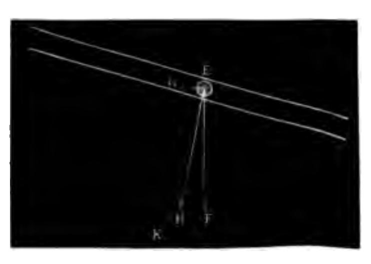


Fig. 155.

dirigée au-dessous de la perpendiculaire EK à la direction *ube, fig. 155, la bille descendra* vers la partie inférieure du

tube; mais si, la force centrifuge étant plus grande, l
tante EH est dirigée au-dessus de la perpendiculaire
156, la bille monte
du tube. On voit do
développant une fo
trifuge assez grand
à-dire en produi
mouvement de rota
fisamment rapide,
devra s'élever jus
l'extrémité B. On c
par là comment l'ea
également s'élever j
partie supérieure d
tube.

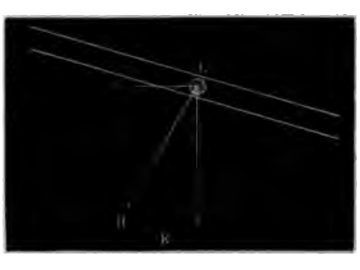


Fig. 156.

La *fig.* 157 montre la disposition d'un troisième apparei
duquel on peut encore mettre en évidence la force centrifu
loppée par
vement de
Deux lames
sorts très
sont courbé
cle, et les
trémités de
d'elles son
l'une à l'au
partie inféri
sorte que c
ressorts form
cercles c
disposés da
plans vertic
pendiculair
eux. Une tige de fer, dirigée suivant le diamètre vertical
aux deux cercles, est fixée à chacun d'eux à sa partie in
tandis qu'à la partie supérieure, elle les traverse libre
passant dans des trous qui ont été pratiqués dans les
Cette disposition permet de déformer les cercles en aba
élevant leur partie supérieure avec la main. La tige de
recevoir un mouvement rapide de rotation sur elle-même
d'une manivelle et d'une corde sans fin; et comme elle e
la partie inférieure des ressorts, elle leur communique

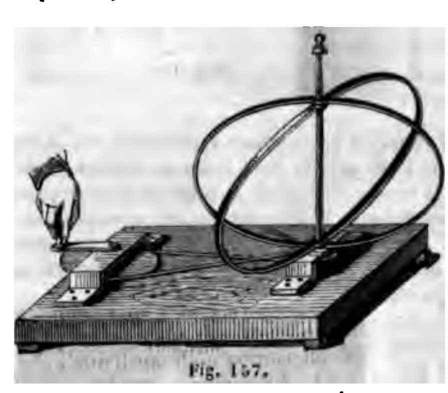
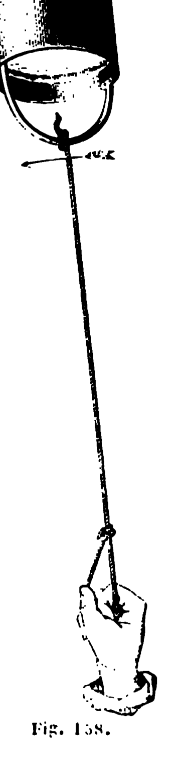


Fig. 157.

vement. Aussitôt que les ressorts tournent, on les voit se déformer; le diamètre vertical se raccourcit, le diamètre horizontal s'allonge, comme le montre la *fig.* 157: et cette déformation est d'autant plus marquée que le mouvement de rotation est plus rapide. On voit encore ici un effet de la force centrifuge : pendant que les ressorts tournent, toutes leurs molécules sont dans les mêmes conditions que si elles étaient tirées par des forces qui tendraient à les éloigner de l'axe de rotation ; et il est clair que, sous l'action de pareilles forces, les ressorts doivent s'allonger dans le sens horizontal.

Si l'on suspend un vase plein d'eau à l'extrémité d'une corde dont on tient l'autre extrémité dans la main, et qu'on fasse tourner le tout comme une fronde, le vase restera plein, quoique, lorsqu'il est au haut du cercle qu'on lui fait décrire, il soit complétement renversé, *fig.* 158. Cela vient de ce que, pendant tout le mouvement, l'eau contenue dans le vase n'est pas soumise à la seule action de son poids : la force centrifuge qui se développe modifie l'effet qui serait produit, si la première force agissait seule. Lorsque le vase est au haut du cercle qu'il décrit, l'eau tend à tomber en vertu de son poids ; mais la force centrifuge, qui est dirigée de bas en haut, tend au contraire à la faire monter : il suffit donc que cette dernière force soit plus grande que la première, pour que l'eau se maintienne dans le vase sans tomber.


Fig. 158.

§ 114. La force centrifuge va nous donner l'explication de certains faits qu'on observe quelquefois.

Lorsqu'un écuyer se tient debout sur un cheval qui parcourt rapidement le contour d'un cirque, il ne se place pas verticalement sur le cheval : son corps est penché vers le centre du cirque, et il l'est d'autant plus que le cheval va plus vite, *fig.* 159. C'est la force centrifuge qui l'oblige à prendre cette position ; il tomberait nécessairement, s'il se plaçait sur le cheval de la même manière que lorsque celui-ci ne marche pas. Les forces centrifuges, qui se déve-

loppent dans les diverses parties du corps de l'écuyer, se composent en une force unique, qui est dirigée horizontalement, et qui tend à l'éloigner du centre du cirque ; cette force se compose, à son



Fig. 159.

tour, avec le poids de son corps, et, pour qu'il ne tombe pas, sous l'action de la résultante qui est oblique, il faut qu'il s'incline comme elle, afin qu'elle passe à l'intérieur de son polygone d'appui sur le cheval (§ 42).

Lorsque, dans les mêmes circonstances, un cheval tourne dans le cirque avec une grande vitesse, on voit quelquefois un écuyer, assis de côté, ne poser que sur le flanc du cheval. Il tomberait infailliblement s'il n'était soumis qu'à l'action de la pesanteur : mais la force centrifuge le maintient en équilibre, comme dans le cas précédent.

Dans les ateliers où des meules de grès sont animées de mouvements rapides de rotation, il arrive quelquefois qu'une meule se brise en éclats, et que les morceaux en sont lancés de tous côtés avec une grande vitesse, ce qui peut donner lieu à des accidents très graves. Pour se rendre compte de cet effet, on observera que, pendant le mouvement d'une meule, chaque molécule est soumise à une force centrifuge qui tend à l'éloigner de l'axe de rotation ; mais les forces moléculaires, qui se développent aussitôt que les molécules *tendent à se déplacer* les unes par rapport aux autres, s'opposent *à l'action des forces* centrifuges. Habituellement les forces molécu-

ires sont assez puissantes pour vaincre les forces centrifuges : mais une meule est en mauvais état, et que son mouvement s'accélère op, les dernières forces finissent par l'emporter, et la meule vole n éclats. Il ne faut pas croire cependant que ce soit la force cen-rifuge qui lance les morceaux de la meule de tous côtés. La force centrifuge existe tant que la meule est entière ; c'est elle qui déter-mine sa rupture ; mais dès le moment qu'un morceau de la meule est détaché, il n'est plus soumis à cette force, et ne se meut qu'en vertu de la vitesse qu'il possédait au moment où il s'est détaché.

§ 112. On se sert, dans diverses circonstances, de la force cen-trifuge pour produire un effet utile. Nous en verrons plusieurs exem-ples : mais pour le moment nous nous contenterons d'indiquer le suivant.

On emploie, depuis quelques années, des machines à force centri-fuge pour sécher promptement les tissus. La *fig.* 160 représente

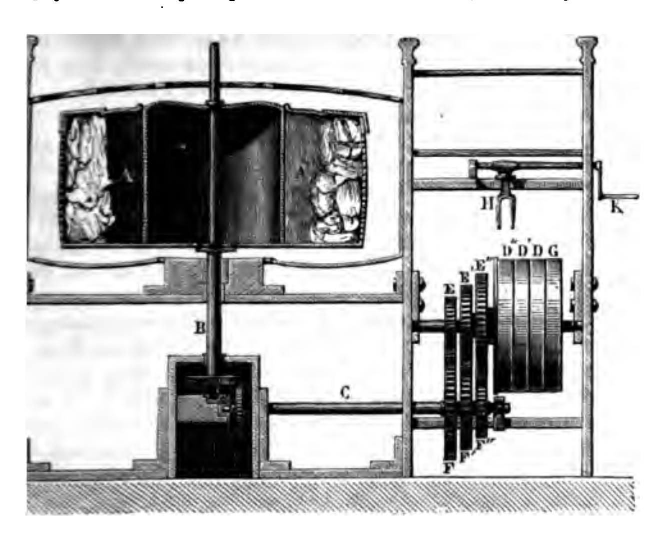


Fig. 160.

une machine de ce genre, telle qu'il en existe dans plusieurs des la-voirs publics de Paris. Un tambour en cuivre AA est destiné à rece-voir le linge mouillé. *Ce tambour est divisé,* par une cloison cylin-drique, *en un compartiment central* qui doit rester vide, et un

compartiment annulaire existant tout autour du premier, qui contenir le linge. Cette disposition est destinée à empêcher q ne mette le linge trop près de l'axe du tambour. Un couvercle, s'enlève à volonté, permet d'introduire le linge, et lorsque le t bour est convenablement chargé, on remet le couvercle, en l'a jettissant fortement. Le tambour est traversé par un axe B, q supporte seul, et avec lequel il peut tourner ; il est d'ailleurs p dans un autre tambour, également en cuivre, qui est solidement l

Pour sécher le linge, on fait tourner rapidement le tambour bile ; on lui fait faire jusqu'à 1500 tours par minute. Ce mouve de rotation développe une force centrifuge très grande sur ch molécule du linge et de l'eau dont il est imprégné ; le linge est pliqué fortement contre la paroi extérieure du tambour, l'eau par les petits trous dont cette paroi est criblée, et elle se réu la partie inférieure du tambour fixe, d'où elle s'écoule par un o pratiqué à cet effet. Lorsque le linge a été soumis à cette opéra pendant 10 à 15 minutes, suivant les cas, il a perdu la presque lité de l'eau qu'il contenait, et il suffit qu'il soit étendu à l'air dant quelques instants, pour qu'il devienne tout à fait sec.

Le mouvement est transmis d'un axe horizontal C, à l'axe ve B, par deux roues d'angle placées au-dessous du tambour ; l' reçoit d'ailleurs son mouvement d'un autre axe qui lui est para et qu'une courroie sans fin fait tourner (*voir* § 58). Mais il s'a donner à l'axe C, et par suite à l'axe B, un mouvement très r et il y aurait des inconvénients graves à produire trop brusqu un pareil mouvement ; aussi la communication de l'axe sur agit la courroie avec l'axe C, permet-elle de faire tourner suc vement ce dernier axe avec des vitesses de plus en plus grande qu'à ce qu'on arrive à la vitesse qui convient à l'opération. Pou la courroie peut agir successivement sur diverses poulies D, I La poulie D est fixée à l'axe qui porte la roue dentée E ; la D′ est fixée à un cylindre creux qui peut tourner librement de cet axe, et qui porte la roue E′ ; et la poulie D″ est fixé second cylindre creux qui peut tourner autour du précéde qui porte la roue E″. La *fig.* 161, qui est une coupe, fa voir la disposition dont il s'agit. Lorsque la courroie agit poulie D, cette poulie fait tourner la roue E, qui engrène a roue F fixée sur l'axe C ; en même temps, les roues F′, F′ tourner les roues E′, E″, et par suite les poulies D′, D″ la communication du mouvement de la courroie à l'axe C se f *les roues E, F*, seulement, et est exactement la même que si le *E′, E″, F′*, F″, et les poulies D′, D″ n'existaient pas. Lor

[redacted]

passer la courroie de la poulie D à la poulie D′, c'est la la courroie fait tourner, et cette roue fait tourner l'axe nt sur la roue F′ : nt est communiqué a poulie D′, et les ′, existaient seules. ue la courroie passe lie D″, le mouve- ansmis à l'axe C par ′, F″. On voit donc roie, marchant tou- ı même manière, successivement la sse aux poulies D, mmunique à l'axe ses croissantes, en hangement du rap- es rayons des roues servent à effectuer ıunication de mou-

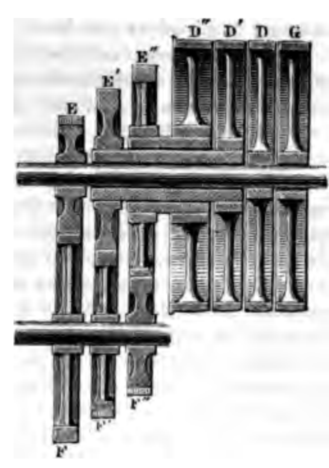


Fig. 101.

le la poulie D, se poulie folle G, sur fait passer la cour- 'on veut que l'axe C ne tourne pas. Une fourchette H, se la courroie, est destinée à la maintenir sur l'une ou poulies. Lorsqu'on veut faire passer la courroie d'une e autre, on fait marcher la fourchette, à l'aide d'une vis ine par une manivelle K ; la tête de la fourchette est écrou qui s'avance à droite ou à gauche, suivant qu'on la manivelle K dans un sens ou dans l'autre ; la four- l'ailleurs dirigée dans ce mouvement par une rainure erse, et le long de laquelle elle doit se mouvoir.

a force centrifuge, qui est développée dans le mouvement t uniforme d'un corps, n'a pas toujours la même inten- ıric avec la vitesse du corps, et aussi avec les dimen- ·cle qu'il décrit. La mécanique rationnelle fait connaître s variations, et voici en quoi elle consiste : *La force* *'st proportionnelle au carré de la vitesse du corps, et* *ıverse du rayon du cercle qu'il décrit.* D'après cette loi, *tout en parcourant le même cercle*, prend une vitesse ;, *4 fois plus grande* que celle qu'il avait, la force cen-

trifuge qui en résultera sera 4 fois, 9 fois, 16 fois plus grande qu'elle n'était auparavant ; si le corps décrit, avec une même vitesse un cercle de rayon double, triple, quadruple du rayon du cercle qui décrivait d'abord, la force centrifuge se réduira à la moitié, au tiers, au quart de sa valeur primitive.

Dans le mouvement de rotation d'un corps solide autour d'un axe, chacune de ses molécules décrit un cercle particulier, et il en résulte une force centrifuge appliquée à cette molécule. La vitesse de la molécule varie de la même manière que la vitesse angulaire du corps : la force centrifuge qui se développe est donc proportionnelle au carré de cette vitesse angulaire. D'un autre côté, si l'on passe d'une molécule A à une molécule B située deux fois plus loin de l'axe de rotation que la première, la vitesse de cette molécule B sera le double de la vitesse de l'autre ; en sorte que, pour cette raison, la force centrifuge qui se développe en B doit être quatre fois plus grande que celle qui se développe en A. Mais, aussi, le rayon du cercle décrit par la molécule B étant le double de l'autre rayon, la force centrifuge doit être, en B, la moitié de ce qu'elle serait sans cette circonstance : donc, en définitive, la force centrifuge en B est seulement double de ce qu'elle est en A. D'après cela on peut énoncer la loi suivante : *Dans le mouvement de rotation d'un corps autour d'un axe fixe, les forces centrifuges, qui se développent aux différents points du corps, sont proportionnelles au carré de la vitesse angulaire, et aussi proportionnelles aux distances de ces divers points à l'axe de rotation.*

§ 114. **Transmission du mouvement dans les corps.** — Lorsqu'une force est appliquée à une partie d'un corps, le mouvement qu'elle produit se transmet ordinairement à toutes les autres parties ; mais cette transmission ne se fait pas instantanément. Si le corps était tout d'une pièce, s'il avait une figure rigoureusement invariable, il n'en serait pas ainsi : dès le moment que la partie soumise à l'action de la force céderait à cette action et se mettrait en mouvement, tout le reste du corps se mouvrait en même temps. Mais on doit se rappeler que les corps sont formés d'une multitude de molécules, qui sont placées à côté les unes des autres sans se toucher. Lorsqu'une force agit directement sur quelques unes de ces molécules, elles se mettent immédiatement en mouvement ; par là elles s'éloignent ou se rapprochent des molécules voisines ; l'équilibre qui existait entre les diverses parties du corps est troublé, et il en résulte le développement de forces moléculaires qui mettent ces molécules voisines en *mouvement* ; celles-ci déterminent à leur tour, et de la même manière, *le mouvement* des molécules qui les suivent, et le mouvement se

unique ainsi, de proche en proche, à toutes les molécules du
s.

rdinairement cette communication de mouvement, dans les corps les, est extrêmement rapide ; en sorte qu'on voit les choses se ser comme si les diverses molécules étaient attachées les unes x autres d'une manière invariable. Mais, dans certains cas, la smission du mouvement aux diverses parties d'un corps est très cile à apercevoir.

Supposons qu'un ressort, tel que ceux qui ont été décrits dans les § 17 et 18, soit attaché à un corps, et en fasse, pour ainsi dire, partie intégrante : lorsqu'on voudra faire mouvoir le corps, en appliquant une force au ressort, on verra la partie du ressort qui est directement soumise à la force se mettre aussitôt en mouvement, le ressort se déformera, puis après un instant, le reste du corps sera entraîné.

C'est ce qui arrive encore lorsqu'un convoi de wagons, qui était au repos, commence à se mettre en marche. Les wagons sont attachés les uns aux autres par des chaînes qui aboutissent à des ressorts fixés sous les caisses. Deux wagons, ainsi réunis, sont habituellement en contact ; mais, si on cherchait à les écarter l'un de l'autre, en leur appliquant des forces assez grandes, les ressorts fléchiraient, et le contact cesserait d'avoir lieu. Dès que la locomotive, qui est en tête du convoi, exerce une force de traction sur le premier wagon qui la suit, elle le met en mouvement ; les ressorts par lesquels ce premier wagon est relié au second se tendent, et, au bout d'un instant, le second wagon commence à marcher ; les ressorts qui existent entre le second wagon et le troisième se tendent à leur tour, puis le troisième wagon est entraîné, et le mouvement se communique ainsi successivement à la totalité du convoi. Pendant le mouvement, les ressorts de jonction reprennent leur forme primitive, et les wagons se remettent en contact les uns avec les autres : le convoi se trouve alors disposé comme avant le départ, et peut être assimilé dans son ensemble à un seul corps solide en mouvement.

Ce qui se passe dans ce dernier exemple doit faire comprendre ce qui a lieu entre les diverses molécules d'un corps solide, et peut en donner, pour ainsi dire, une image excessivement agrandie. On voit, en effet, que les différents wagons jouent le rôle des molécules du corps qui se mettent successivement en mouvement ; et que les ressorts qui les unissent tiennent lieu des forces intérieures qui se développent *entre ces molécules*, et par lesquelles le mouvement *se transmet de proche en proche.*

§ 145. C'est ici le lieu d'entrer dans quelques détails sur les impressions qu'on éprouve, lorsqu'on est emporté par une voiture ou un bateau en mouvement.

Si le mouvement de la voiture ou du bateau était parfaitement régulier, on ne s'apercevrait nullement de sa marche ; la vue d'objets extérieurs, qu'on sait être immobiles, tels que des arbres, des maisons, serait indispensable pour qu'on pût reconnaître qu'on n'est pas en repos. Il n'y a donc, dans le mouvement dont on est animé, que les irrégularités de ce mouvement qui se fassent sentir directement.

Supposons qu'on soit assis dans une voiture, et qu'on aille en avant, c'est-à-dire qu'on ait la figure tournée du côté vers lequel la voiture marche. Si le mouvement de la voiture vient à s'accélérer brusquement, cette accélération de mouvement se transmet d'abord aux parties inférieures du corps, qui sont immédiatement en contact avec la voiture, et le haut du corps, n'y participant pas de suite, se trouve rejeté en arrière. Si, au contraire, le mouvement de la voiture se ralentit brusquement, ce ralentissement se transmet encore aux parties inférieures du corps avant d'atteindre les parties supérieures, et le haut du corps se porte en avant, comme s'il avait reçu une impulsion. Lorsqu'on va en arrière, c'est-à-dire qu'on tourne le dos au côté vers lequel la voiture s'avance, les choses se passent d'une manière inverse. Une accélération brusque du mouvement fait incliner le haut du corps en avant ; tandis qu'un ralentissement brusque le fait incliner en arrière.

Un grand nombre de personnes éprouvent des nausées lorsque, étant en voiture, elles vont en arrière : voyons si cet effet peut avoir une cause dans le mouvement lui-même. Lorsque le mouvement est parfaitement régulier, on ne s'en aperçoit pas ; les diverses parties du corps sont, les unes par rapport aux autres, exactement dans les mêmes conditions que si le corps était en repos ; il est donc impossible que, dans ce cas, le sens du mouvement ait la moindre action sur les organes. La terre, dans son mouvement autour du soleil, est animée d'une très grande vitesse, puisqu'elle parcourt plus de 30 kilomètres en une seconde ; cependant nous ne distinguons pas si nous allons en avant ou en arrière lorsque nous nous tournons soit du côté de l'orient, soit du côté de l'occident. Il n'y a donc que les irrégularités du mouvement qui puissent occasionner le malaise que nous cherchons à expliquer. Mais, si nous réfléchissons à ce qui a été dit il n'y a qu'un instant, nous verrons que ces irrégularités se font sentir de la même manière, *quel que soit le* sens dans lequel on marche ; ce qu'une accélération

[redacted]

mouvement produit lorsqu'on va en avant, un ralentissement le
duit de même lorsqu'on va en arrière. Or, dans le mouvement
une voiture, des accélérations et des ralentissements de diverses
andeurs s'entremêlent en se succédant : en sorte qu'on doit en
nclure que les effets produits sur les organes sont les mêmes, soit
l'on aille en avant, soit qu'on aille en arrière. Il y a d'ailleurs une
servation que bien des personnes ont pu faire : lorsque, pendant
nuit, on s'est endormi quelque temps dans une voiture fermée
ii est en mouvement, et qu'on se réveille, on ne peut pas distin-
ier le sens du mouvement de la voiture ; on a besoin de se rap-
ler la manière dont on s'est placé, pour savoir si l'on marche en
ant ou en arrière. Les irrégularités du mouvement produisent
nc exactement le même effet sur les organes, quel que soit le sens
la marche, puisqu'elles ne peuvent pas servir à faire reconnaître
sens.

On est obligé de conclure de ce qui vient d'être dit que, dans la
arche en arrière, il n'y a pas de cause mécanique qui puisse occa-
onner des nausées. Ce qui les produit, c'est uniquement la vue des
jets extérieurs. Lorsqu'on est accoutumé à aller en avant dans
e voiture, les objets à côté desquels on passe semblent se dé-
acer d'une certaine manière ; si, contrairement à l'habitude qu'on
contractée, on se place dans une voiture de manière à aller
arrière, les objets qui sont au bord de la route sembleront
core se déplacer, mais autrement qu'à l'ordinaire, et il en résul-
a une espèce d'étourdissement, qui est la seule cause des nausées
on éprouve en pareil cas Il suffirait donc de se soustraire, par un
yen quelconque, à la vue des objets extérieurs, pour faire dispa-
tre la cause du malaise qu'on ressent, et par suite le malaise lui-
me.

Nous venons de voir qu'il n'y a pas, dans la marche en arrière,
cause mécanique qui puisse agir sur les organes, par la raison
e les secousses, les mouvements plus ou moins irréguliers qui sont
n-mis au corps par la voiture, sont les mêmes, quel que soit le
ns dans lequel on marche ; mais, si le sens du mouvement ne peut
n produire, il peut y avoir, dans le mouvement lui-même, une
use mécanique de malaise. C'est ainsi que le mal de mer est occa-
nné par les balancements successifs que les vagues transmettent
navire sur lequel on se trouve. Dans ce mouvement de balan-
ment, chaque molécule du corps, au lieu de se mouvoir en ligne
oite, décrit une ligne sinueuse, telle que la ligne AB, *fig.* 162
moment *où cette molécule se trouve* dans l'une des parties infé-
ures de la ligne qu'elle est obligée de parcourir, en C, par

exemple, elle est à peu près dans les mêmes conditions que si elle se mouvait le long d'une circonférence de cercle CC'C'' : il se développe donc une force centrifuge qui détermine une pression de la molécule sur celles qui sont dans son voisinage. Un effet analogue se produit, lorsque cette molécule se trouve en D, dans une des parties supérieures de la ligne AB; la force centrifuge qui s'y développe donne lieu à une pression dirigée en sens contraire de la précédente. Ainsi, par suite du balancement continuel du navire, les organes qui sont à l'intérieur du corps exercent les uns sur les autres des pressions différentes de celles qui ont lieu à l'état de repos, pressions qui varient d'ailleurs continuellement et insensiblement d'un moment à un autre : on conçoit bien qu'il puisse en résulter un malaise, et c'est en effet ce qui occasionne le mal de mer.



Fig. 162.

§ 116. **Choc de deux corps.** — Lorsqu'un corps est en mouvement, et qu'il en rencontre un autre qui est en repos, ou qui n'a pas le même mouvement que lui, il se produit un *choc*. Nous allons examiner de quelle manière les mouvements des deux corps se trouvent brusquement modifiés par l'effet de ce choc.

Supposons, pour simplifier, qu'il s'agisse de deux corps sphériques A, B, *fig.* 163, qui se meuvent tous deux suivant une même ligne droite CD, et dans le même sens indiqué par la flèche. Pour qu'il puisse se produire un choc entre ces deux corps, il est nécessaire que la vitesse du corps A, qui est en arrière, soit plus grande que celle du corps B; s'il en est ainsi, le premier se rapprochera de plus en plus du second, et bientôt le choc aura lieu.



Fig. 163.

Au moment où le corps A atteindra le corps B, il tendra à faire marcher plus vite les premières molécules de ce corps, et cette accélération de mouvement se transmettra à toute la masse du corps B. Mais nous avons vu que la transmission du mouvement ne s'effectue pas instantanément : aussi en résultera-t-il une déformation *dans le corps* B. Les premières molécules atteintes céderont à l'impulsion qu'elles auront reçue; elles prendront une vitesse plus grande

[redacted]

celle du reste du corps, et se rapprocheront ainsi de son centre ; molécules voisines, poussées par les forces moléculaires qui se eloppcront, prendront, à leur tour, un mouvement plus rapide, se rapprocheront aussi du centre du corps B. En sorte que, au at d'un intervalle de temps qui est toujours extrêmement court, corps B se trouvera aplati, dans l'endroit où le corps A l'aura eint.

Mais ce qui a lieu pour le corps B a lieu de même pour le corps Les molécules de celui-ci qui sont en avant, en rencontrant le rps B, qui est un obstacle à la continuation de leur mouvement, ivent se ralentir brusquement : celles qui les suivent se ralentis- nt à leur tour, et le corps A s'aplatit comme l'autre, du côté par quel le contact a eu lieu. La *fig.* 164 montre en quoi consiste cet latissement simultané des deux corps, tout l'exagérant, afin de le rendre plus sensible. A partir du moment où les deux corps ont mmencé à se toucher, ils se déforment de us en plus, comme nous venons de le voir. ais, en même temps, l'accélération de mou- ment qui a été donnée aux premières mo- ules de B se transmet peu à peu à toute la sse du corps, et le ralentissement des molécules de A qui sont avant se communique également peu à peu à toute la masse de autre corps : la vitesse de A diminue, et la vitesse de B aug- nte. Tant que la vitesse du premier corps A, tout en diminuant, plus grande que celle du second corps B, qui va en augmentant, léformation continue à se produire, les corps s'aplatissent de plus plus : mais aussitôt que les vitesses des deux corps sont devenues ales, la déformation n'augmente plus Dès lors il se passera des oses différentes, suivant la nature des deux corps qui se sont oqués.

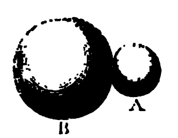


Fig. 164.

En premier lieu, si les corps A et B sont tout à fait dépourvus lasticité, ils ne tendront en aucune manière à reprendre leurs mes primitives : le choc sera terminé aussitôt qu'ils auront des esses égales, et, à partir de ce moment, ils se mouvront ensemble s se séparer. C'est ce qui arrivera, par exemple, si les deux corps nt il s'agit sont deux balles de plomb.

En second lieu, si les corps A et B sont élastiques, si ce sont deux les d'ivoire, par exemple, et que la déformation qu'ils ont éprouvée it pas dépassé la *limite de leur élasticité*, le choc ne sera pas ter- *né au moment où leurs vitesses seront* devenues égales. En effet, *deux corps tendent à revenir* à la forme qu'ils avaient avant le

choc ; les molécules de chacun d'eux, qui avaient été refoulées vers leurs centres respectifs, s'en éloignent pour se replacer comme elles étaient d'abord, et les deux corps se repoussent. La vitesse du corps A continue donc à diminuer, celle du corps B continue à augmenter, et bientôt les deux corps se séparent, en s'éloignant de plus en plus l'un de l'autre. Les choses se passent comme si un ressort à boudin avait été placé entre les deux corps au moment du choc, *fig.* 165 : ce ressort, comprimé d'abord par l'excès de la vitesse du corps A sur le corps B, aurait cessé de se raccourcir lorsque les vitesses des deux corps seraient devenues égales ; puis, en se détendant, il aurait éloigné les deux corps l'un de l'autre, en augmentant toujours la vitesse de B et diminuant celle de A.

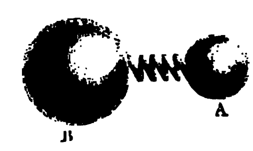


Fig. 165.

Pendant toute la durée du choc, la vitesse du corps B augmente constamment, et conserve conséquemment le même sens : mais il n'en est pas toujours de même du corps A. Après la première partie du choc, c'est-à-dire au moment où les deux corps ont la même vitesse, cette vitesse est dirigée dans le même sens que les vitesses initiales des deux corps : la vitesse du corps A a diminué, sans changer de sens. Mais, pendant la seconde partie du choc, la vitesse de ce corps, qui diminue toujours, peut devenir nulle, avant que le choc soit complétement terminé ; et le corps A, continuant à être repoussé du corps B par la réaction des molécules qui ont été déplacées, prendra un mouvement en sens contraire.

Des circonstances analogues à celles qu'on vient d'indiquer en détail se produiront dans le cas où les deux corps se meuvent en sens contraires, avant de se rencontrer ; et aussi dans les cas où un seul des deux corps est en mouvement avant le choc.

§ 147. Le changement que le choc apporte dans les vitesses des deux corps qui se sont rencontrés dépend de leurs masses respectives. A un moment quelconque, pendant que le choc se produit, il existe entre les deux corps une espèce de répulsion ; le corps B est soumis à une force qui tend à accélérer son mouvement, et le corps A à une force de sens opposé qui tend à ralentir le sien : ces deux forces sont égales et contraires, comme le seraient les pressions que les corps éprouveraient en même temps de la part d'un ressort à boudin qu'on aurait introduit entre eux. Mais ces deux forces, agissant sur des corps dont les masses sont généralement inégales, ne produiront pas sur chacun d'eux des changements égaux de vites-

avons vu, § 94, que deux corps, sous l'action d'une même ., ou de deux forces égales, ce qui revient au même, acquièrent itesses inversement proportionnelles à leurs masses : si nous iosons que la masse du corps B soit quatre fois plus grande que du corps A, pendant que la vitesse du corps B s'accroîtra de écimètre par seconde, celle du corps A diminuera de 4 décires par seconde.

dmettons que, la masse du corps B étant toujours quatre fois s grande que celle du corps A, la vitesse primitive de A soit 15^m par seconde, et celle de B de 10^m par seconde. Par l'effet choc, la vitesse du premier se réduira à 11^m par seconde, et vitesse du second s'élèvera à cette valeur. A ce moment le c sera terminé, si les corps sont dépourvus d'élasticité, et ils mouvront ensemble avec leur vitesse commune de 11^m. Si les ps sont élastiques, et que la limite de l'élasticité n'ait pas été assée, ils reprendront exactement la forme qu'ils avaient d'abord, il se développera par là, entre eux, des forces répulsives préément égales à celles qui s'étaient développées pendant la prere partie du choc. La vitesse du corps B augmentera donc ore de 4^m, et deviendra de 12^m par seconde ; tandis que celle corps A éprouvera une nouvelle diminution, égale à celle elle a déjà éprouvée, et se réduira à une vitesse de 7^m par sede.

dmettons encore que, A et B ayant les mêmes masses que préemment, la vitesse initiale de A soit de 7^m par seconde, et celle B de 2^m par seconde. Après que les deux corps auront atteint plus grande déformation, ils auront une même vitesse de par seconde ; la vitesse du premier aura diminué de 4^m par onde, et celle du second aura augmenté de 1^m seulement. es corps sont élastiques, et que la limite de l'élasticité n'ait été dépassée, la vitesse du corps B augmentera encore de pendant la seconde partie du choc, et deviendra de 4^m par onde. Mais la vitesse du corps A, qui a déjà diminué de 4^m, et é ainsi réduite à 3^m par seconde, ne peut pas diminuer encore 4^m : aussi sera-t-elle d'abord complétement détruite, puis le s reprenant un mouvement en sens contraire, acquerra dans sens une vitesse de 1^m par seconde.

es deux exemples doivent faire comprendre comment les vitesses deux corps seront modifiées par le choc, dans les différents cas pourront se présenter.

118. Des billes d'ivoire, présentant un grand degré d'élasti- *permettent de vérifier ce que* nous venons de dire. Si l'on

suspend d'abord deux billes égales à côté l'une de l'autre, *fig.* 166, puis qu'on écarte l'une d'elles, A, de sa position d'équilibre, comme le montre la *fig.* 167, cette bille, en retombant, viendra choquer l'autre. Au moment où le choc commence, la vitesse de la bille B est nulle ; d'ailleurs, les masses des deux billes étant les mêmes, la vitesse gagnée par l'une d'elles sera égale à la vitesse perdue en même temps par l'autre ; donc, au moment où les deux billes seront le plus déformées, elles auront chacune pour vitesse la moitié de la vitesse qu'avait la bille A au commencement du choc. Pendant la seconde partie du choc, la vitesse de la bille B augmentera autant qu'elle a augmenté pendant la première partie : c'est-à-dire qu'à la fin du choc, cette vitesse sera égale à la vitesse primitive de la bille A ; dans le même temps, la vitesse de la bille A, qui s'était déjà réduite de moitié, diminuera encore d'autant, et par suite elle deviendra tout à fait nulle. On doit donc observer, et l'on observe en effet, qu'aussitôt que le choc a eu lieu, la bille A reste immobile ; et que la bille B, se mouvant sur un arc de cercle, monte à une hauteur égale à celle dont on avait laissé tomber la bille A. En s'élevant ainsi, la bille B ...it par perdre complétement la vitesse qui lui avait été donné...

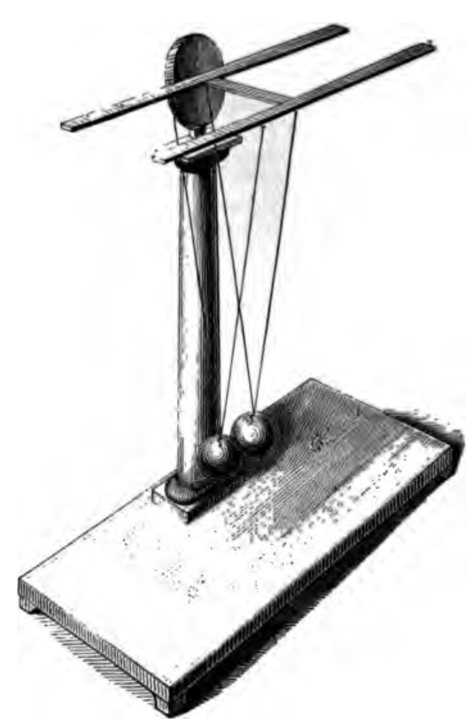


Fig. 166.

[redacted]

elle redescend, sous l'action de la pesanteur, et vient
ille A : alors elle s'arrête, la bille A remonte jusqu'au
n l'avait laissée tomber précédemment, et le mouve-
tinue ainsi indéfiniment, jusqu'à ce qu'il soit détruit
sistances
le l'air et
suspen-
es.
n de deux
suspend
d nombre
le l'autre,
emple, et
e la pre-
position
fig. 168,
'elle pro-
tombant,
à un effet
. D'après
nt de voir,
première
seconde,
avait pas
ait passer
seconde

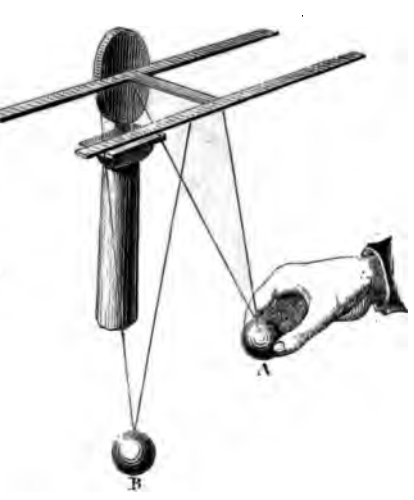


Fig. 167.

vitesse de la première, qui se trouverait par là réduite
lmettons qu'il en soit encore ainsi. Dès lors la seconde
premier choc fait passer brusquement de l'état de repos
ouvement, va choquer la troisième, et lui transmettre la
vitesse. A la suite de ce second choc, la seconde bille se
one en repos; elle n'aura été en mouvement que pendant
le temps, excessivement court, qui sépare le premier
ond. On verrait de même que la vitesse passera de la
lle dans la quatrième; de la quatrième dans la cin-
qu'enfin elle sera transmise à la septième, qui, ne ren-
s d'obstacle à son mouvement, se mouvra en tournant
n point de suspension. C'est en effet ce qu'on observe :
omber la première bille d'une certaine hauteur, on la
r dès *que le choc a eu lieu, et* aussitôt la septième bille
élever à la hauteur dont on avait laissé tomber la pre-
mière bille, en retombant, produit à son tour un choc,

D'après ce que nous avons vu dans le § 103, le corps A p
regardé comme animé à la fois de deux vitesses, dont l'une C
dirigée parallèlement à
mn, et l'autre CF serait
diculaire à la précédente. I
on regardera le corps B
animé d'une vitesse C'E' p
à *mn*, et d'une autre vite
qui lui est perpendiculair

Si les corps A et B, au
où ils commencent à se
au point *o*, étaient animé
ment des vitesses CF, C'F
feraient que glisser l'un s
tre, et il n'y aurait pas c
Le choc ne peut donc
qu'aux vitesses CE, C'E', e
faut-il, pour cela, que la p
soit plus grande que la s

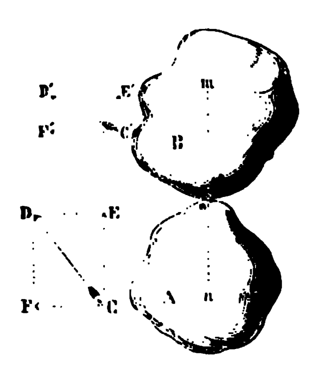


Fig. 169.

En vertu de ces dernières vitesses, le choc se produira de l
manière que si elles existaient seules, et elles se trouveror
fiées exactement de même, par l'action mutuelle des deu
Il suffira de composer les vitesses CF, C'F', que le choc
changées, avec les vitesses que les corps posséderont, paral
à *mn*, après la fin du choc, pour obtenir les vitesses défini
deux corps, au moment où ils se sépareront. Deux exemp
du jeu de billard, feront voir comment on pourra réalise
vient d'être dit.

§ 120. Lorsqu'une bille, en mouvement sur un billard,
rencontrer une autre qui était immobile, il se produit u
nous allons voir dans quelles directions, et avec quelles
les deux billes doivent se mouvoir après le choc.

Si la première bille se meut suivant une ligne droite dir
le centre de la seconde, si elle vient la prendre *en plein*, i
duira le même effet que dans le choc de deux billes égales
dues à côté l'une de l'autre, page 150 ; la première bil
toute sa vitesse à la seconde, et restera immobile.

Mais si la première bille rencontre la seconde de côté,
montre la *fig*. 170, où la ligne AB représente le chemin
première bille vient de parcourir, les choses ne se passe
de même. La vitesse BC de la première bille se décompose
deux vitesses BD et BE, dont l'une est dirigée suivant

ꞏux billes, c'est-à-dire suivant la perpendiculaire à , au point où elles se touchent, et l'autre suivant une culaire à la précé- ꞏc se produira en tesse BD, comme ule; et l'on sait que ın pareil choc, en- ꞏs égales, c'est de complétement la e la première bille ꞏde. Après le choc, ꞏille, ne possédant vitesse BE, se cette vitesse dans BF; et la seconde, a vitesse BD, dé- ꞏBG. On voit que c'est la position du point par lequel ille est touchée, qui détermine les directions suivant ꞏ deux billes se meuvent après le choc.

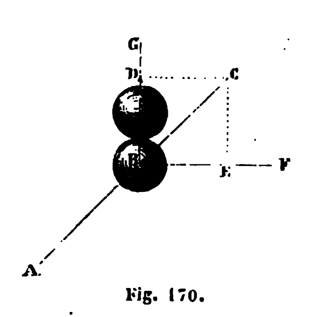


Fig. 170.

ꞏ, en second lieu, qu'une bille qui se meut suivant la ꞏ. 171, vienne rencontrer une des bandes du billard. sera la vitesse BC de n deux composantes, rigée perpendiculaire- ande, l'autre BE pa- ꞏbande. Le choc aura ne que si la compo- istait seule. Comme la est élastique, ne peut éder au choc, la vi- ꞏa détruite pendant la ꞏrtie du choc: puis, onde partie, la bille reprendra, en sens contraire, une égale à la précédente Pour trouver le mouvement la bille, au moment où elle quittera la bande, il faut ꞏser la vitesse BE, qui n'a pas été modifiée, avec la , et l'on trouvera la vitesse BC', dont la bille sera nitivement; elle se mouvra suivant la direction de ꞏ. On peut observer ici que l'angle C'BD' est égal à), à cause de l'égalité des triangles dont ils font ꞏ les angles CBD, ABD', étant opposés par le sommet, *donc les angles ABD' et C'BD'* sont aussi égaux. C'est

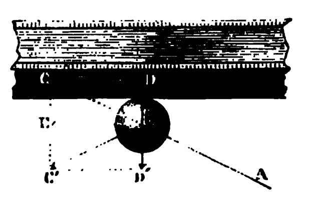


Fig. 171.

ce qu'on énonce ordinairement en disant que *l'angle d'*
(ABD') *est égal à l'angle de réflexion* (C'BD').

§ 121. Lorsqu'un corps vient en choquer un autre, no
vu que le mouvement ne se communique aux molécules du
corps que de proche en proche, et qu'il en résulte une défo
de ce corps. Si le choc est faible, la déformation pourra ne
passer la limite de l'élasticité, et le corps reprendra ensuite
ment la figure qu'il avait auparavant. Mais si le choc est
lent, il pourra en résulter une déformation permanente, o
une rupture; cela tient à ce que les premières molécules qu
vent l'effet du choc prennent brusquement un mouvement
qui les écarte notablement de leur position d'équilibre ava
mouvement se soit transmis aux molécules voisines. On
par là que la vitesse, plus ou moins grande, avec laquelle
deux corps vient choquer l'autre, pourra donner lieu à d
très différents : c'est ce que quelques exemples feront bi
prendre.

Imaginons qu'une porte de bois ne soit retenue par rien q
l'empêcher de tourner librement sur ses gonds. Si l'on p
boulet, et qu'on le lance, avec les mains, contre cette po
produira un choc, qui fera tourner la porte, sans détermin
formation bien sensible. Si, au contraire, le boulet était lan
canon, il traverserait la porte, sans la faire tourner, en e
avec lui seulement les parties qui étaient sur son passage :
lécules soumises immédiatement à l'effet du choc ont pris
ment une telle vitesse, qu'elles se sont éloignées des molé
sines avant que le mouvement ait pu se communiquer
de la porte.


Fig. 172.

Une balle de plo
lancerait légèrement
carreau de fenêtre s
voyée par le carre
qu'il y ait rupture.
lancée plus fortemen
main, elle traverse
reau, en déterminan
nombre de fentes, q
neront tout autour d
lequel elle aura pass
la balle est lancée
arme à feu, elle ne fera dans le carreau qu'un trou rond par
passera; le reste du carreau sera intact.

n boulet de canon vient à traverser obliquement une
, de manière à rencontrer sur son chemin plusieurs bar-
produit successi-
ers chocs : les ef-
chocs successifs
les mêmes. La *fig.*
o ce qui a lieu
boulet rencontre
aux seulement. Le
ui se trouve sur son
, rompu net, com-
re : les parties qui
sont pas déformées.
t pas de même du
rreau : il a bien été
: le boulet, mais les
stantes sont cour-
le sens du mouve-
vitesse du boulet,
par la rencontre du
arreau, n'a pas pu
sur le second un
si violent ; pendant
lu boulet sur ce se-
reau, le mouvement
emps de se commu-
r une plus grande
, et c'est ce qui a dé-
a courbure des par-
nlevées.

L'effet produit dans
dépend aussi de la
corps qui reçoit le
conçoit que, plus le
qué aura une faible
lus il cédera facile-
ction du choc ; s'il
sse considérable, il
ifficilement, et il
résulter une rup-
la portion du corps
oquée directement.

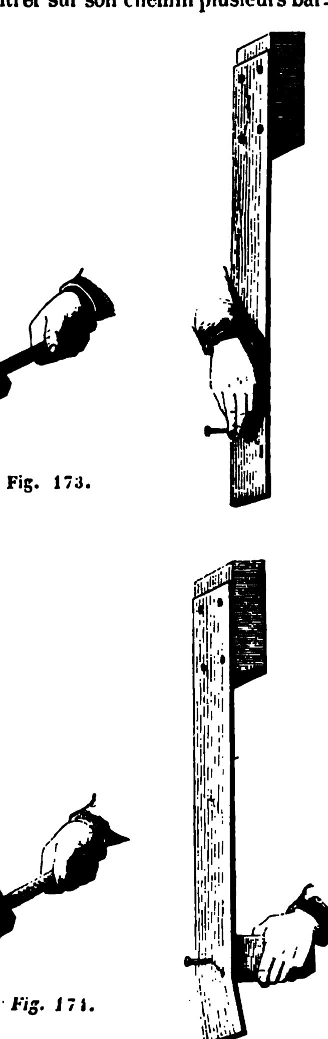


Fig. 173.

Fig. 174.

Lorsqu'on veut enfoncer un clou dans une planche
n'est appuyée sur rien, *fig.* 173, la planche fléchit à ch
de marteau, et le clou n'entre pas : le mouvement se co
trop facilement à toute la partie de la planche, qui n'e
puyée. Mais le clou s'enfoncera si l'on vient à poser un
bois derrière la planche, *fig.* 174, en le tenant ave
sans l'appuyer. Pour que la planche pût fléchir à chaq
marteau, il faudrait qu'elle entraînât le morceau de b
placé derrière elle ; ce mouvement, produit par une mêm
peut pas être aussi rapide que si le morceau de bois n'y
pas : aussi chaque coup de marteau donne-t-il lieu à
mation de la planche, dans les points où le choc se trans
tement, et le clou s'enfonce. Dans cette opération, ce n'
pression qu'il faut exercer du côté opposé à celui où l'on
entrer le clou : mais c'est une masse qu'il faut placer de
nière que, participant nécessairement au mouvement q
la planche, elle l'empêche de céder trop facilement à
qu'elle reçoit.

DES RÉSISTANCES PASSIVES.

§ 123. Une machine est destinée à vaincre certaines r
telles que le poids des corps qu'elle doit élever, la co
molécules des corps qu'elle doit pulvériser, etc. Mais, o
sistances *utiles*, en vue desquelles la machine est empl
produit toujours d'autres résistances, qui naissent de s
ment, et qui, en s'opposant sans utilité à ce mouvement,
une portion plus ou moins grande de la force motrice.
tances sont désignées, en général, sous le nom de *résis*
sives.

Les résistances passives sont de plusieurs espèces :

1° Lorsqu'on cherche à faire glisser un corps sur u
éprouve une certaine résistance ; il faut exercer un ce
pour déterminer le glissement, et aussi pour entretenir
ment, après l'avoir produit : cette résistance est appelé
au glissement, ou simplement *frottement*.

2° Lorsqu'on cherche à faire rouler un corps cylindri
surface plane, on éprouve encore une certaine résista
produit, par exemple, dans le roulement des roues de vo
sol : c'est ce que l'on nomme la résistance au roulemen

[redacted]

es cordes entrent dans la composition d'une machine, nvenablement leur objet, elles doivent présenter une te Leur défaut de flexibilité donne lieu à des résis- signe sous le nom de *roideur des cordes.*

ntes les machines se meuvent, soit dans l'air, soit molécules d'air ou d'eau, qui se trouvent dans le voi- es mobiles, en reçoivent un mouvement qui ne peut 'aux dépens de la force motrice de la machine. C'est e la ***résistance des fluides.***

passer en revue successivement ces diverses espèces passives, et en indiquer les lois.

tement. — Lorsqu'un corps pesant repose sur une t horizontale, sur une table, par exemple, et qu'on aire glisser sur cette surface, on éprouve une résis- , entre les molécules du corps et de la table, une adhé- ose à leur séparation, et cette adhérence n'est vain- n applique au corps une force de traction suffisamment andeur de cette force sert de mesure à la résistance ie.

ent que le corps dont on vient de parler a commencé à esoin, pour entretenir son mouvement sans que sa e, de lui appliquer constamment une certaine force tte force est employée tout entière à vaincre le frotte- développe entre le corps et la surface sur laquelle il it, comme dans le cas précédent, servir de mesure à ccasionnée par le glissement.

raction qu'on a dû employer dans le premier cas n'est même que celle qu'on a appliquée au corps dans le le est souvent plus grande. On doit donc distinguer its différents : le frottement au départ, et le frottement ivement. L'un et l'autre ont été l'objet de recherches s que nous allons indiquer.

r déterminer les lois du frottement au départ, Cou- i (en 1781) de l'appareil représenté par la *fig.* 175. qu'on chargeait de poids à volonté, pouvait glisser sur horizontaux B, placés à côté l'un de l'autre ; une corde aisse passait dans la gorge d'une poulie C, descen- ent, et se terminait par un plateau D. Après avoir se A, il suffisait de mettre des poids dans le plateau D, nvenable pour que le mouvement commençât à se pro- *ls mis dans le plateau*, augmentés du poids du pla- *étaient la mesure de* la force de traction qui avait

mis la caisse en mouvement, et par suite la mesure du frottement qui s'opposait à ce mouvement. On pouvait faire varier à volonté : 1° la charge de la caisse A ; 2° la nature des surfaces frottantes, en mettant sur les madriers, et fixant au-dessous de la caisse, les corps

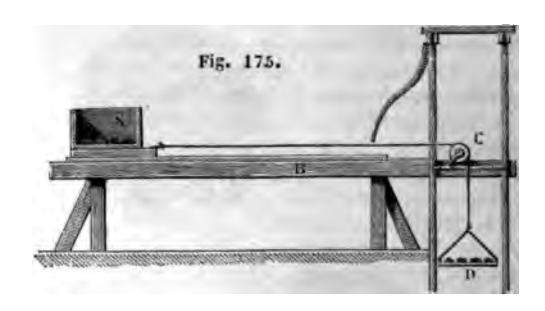


Fig. 175.

de diverses espèces qu'on voulait soumettre à l'expérience ; 3° enfin la grandeur des surfaces frottantes, en faisant varier l'étendue de la surface par laquelle la caisse s'appuyait.

Le même appareil a servi à Coulomb pour étudier les lois du frottement pendant le mouvement. Mais, dans ce cas, la détermination de la grandeur du frottement présentait plus de difficulté. Dès le moment que la caisse avait commencé à se déplacer, il fallait observer son mouvement, en reconnaître les lois, en mesurer la vitesse. Les moyens que Coulomb a employés pour cela manquaient de précision, et les lois du frottement qu'il a déduites de ses expériences n'étaient que très imparfaitement démontrées.

En 1834, M. Morin a repris les expériences de Coulomb, pour les faire sur une plus grande échelle, et avec plus d'exactitude. Il a cherché de nouveau les lois du frottement au départ, et celles du frottement pendant le mouvement : mais c'est surtout en vue de ces dernières qu'il a entrepris son travail. A cet effet, il a remplacé les moyens que Coulomb avait employés, par des moyens beaucoup plus précis, que nous allons indiquer.

La difficulté que présentent les recherches relatives au frottement pendant le mouvement consiste, comme nous l'avons déjà dit, à observer les lois du mouvement qui se produit sous l'action des poids placés dans le plateau D, *fig.* 175. Pour y arriver, M. Morin fixa à l'axe de la poulie C un large disque de cuivre E, *fig.* 174, qui devait tourner en même temps qu'elle : il suffisait évidem-

ment d'étudier les lois du mouvement de ce disque, po conclure celles du mouvement de la corde, et aussi de la cais Le disque fut, en conséquence, recouvert d'une feuille de papier, et un mécanisme d'horlogerie, qui pouvait donner un mouvement uniforme de rotation à un pinceau imbibé d'encre de Chine, fut disposé en avant du disque, de manière que la pointe du pinceau s'appuyât légèrement sur le papier, ainsi que le montre la *fig.* 176. Si la caisse A restait immobile, et que le mécanisme d'horlogerie fît marcher le pinceau, il est bien clair qu'il tracerait une circonférence de cercle sur le disque E. Mais si la caisse A est en mouvement, qu'en conséquence le disque tourne, le pinceau, mû par le mécanisme d'horlogerie, ne décrira pl cercle sur la surface du disque : il décrira une ligne courbe q pendra à la fois du mouvement du pinceau et de celui du disqu mouvement du pinceau étant connu, on conçoit que la forme de ligne courbe devra faire connaître le mouvement du disque : ce qu'on comprendra facilement si nous entrons dans que détails.



Fig. 1

Soit ABC, *fig.* 177, la courbe tracée sur le disque p pinceau, et A*bc*, le cercle que le pinceau y aurait tracé, si le disque n'avait pas été mis en mouvement. Nous supposerons que le pinceau, qui se meut uniformément, parcoure les arcs égaux A*b*, *bc*, . . . , chacun en une seconde. Le pinceau était au point A, lorsque le disque a commencé à se mouvoir. Au bout d'une seconde, le pinceau s'est trouvé en *b* : à ce moment il a marqué sur le disque, non pas le point *b*, mais le point B, qui est venu se placer sous sa pointe, en vertu de la rotation du disque : le disque a donc t de l'angle *b*OB pendant la première seconde. Au bout de de condes, le pinceau *s'est trouvé en c* ; il a fallu qu'à ce mo *le point C du disque vînt se placer* en *c*, pour être v

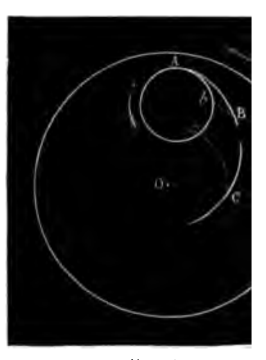


Fig. 177.

par le pinceau : donc, pendant les deux premières secondes, le disque a dû tourner de l'angle cOC. En continuant de la même manière, on trouvera les angles dont le disque a tourné pendant les trois premières secondes, pendant les quatre premières secondes, etc.

Dans toutes ses expériences, M. Morin a trouvé que les angles décrits par le disque, pendant la première seconde, pendant les deux premières secondes, pendant les trois premières secondes.... étaient entre eux comme les nombres 1, 4, 9,..., c'est-à-dire qu'ils étaient proportionnels aux carrés des temps employés à les décrire. Les chemins parcourus par la caisse A, pendant les mêmes intervalles de temps, étaient donc aussi proportionnels aux carrés de ces intervalles de temps ; ou, en d'autres termes, le mouvement de la caisse A était de même nature que celui d'un corps qui tombe librement sous l'action de la pesanteur : c'était un mouvement uniformément accéléré (§ 86). L'angle dont le disque avait tourné pendant la première seconde faisait connaître la grandeur du chemin parcouru en même temps par la caisse ; le double de ce chemin était la vitesse acquise par la caisse, après une seconde de mouvement.

La force qui détermine le mouvement de la caisse A est le poids du plateau D et de ce qu'il contient ; mais cette force est détruite en partie par le frottement qu'éprouve la caisse en glissant : la portion restante de cette force donne lieu à l'accélération du mouvement. Cette accélération se produisant uniformément, on en conclut que l'excès du poids du plateau D, avec ce qu'il contient, sur le frottement de la caisse, a toujours la même valeur : ce frottement reste donc le même pendant toute la durée du mouvement.

Pour trouver la grandeur du frottement, on observera que l'expérience fait connaître la vitesse acquise par la caisse A, après une seconde de mouvement, ainsi que nous l'avons dit il n'y a qu'un instant. On pourra trouver (§ 93) la grandeur de la force capable de donner cette vitesse au corps formé de la réunion de la caisse A et du plateau D : si l'on retranche cette force du poids du plateau D, la différence sera la valeur du frottement qu'éprouve la caisse A.

§ 126. La comparaison des résultats obtenus dans un grand nombre d'expériences a conduit M. Morin à admettre, comme entièrement exactes, les lois suivantes, données par Coulomb.

Le frottement pendant le mouvement est :

1° Proportionnel à la pression qui s'exerce entre les deux corps qui frottent l'un sur l'autre ;

• *Indépendant de l'étendue des surfaces de contact ;*
• *Indépendant de la vitesse du mouvement.*

rottement au départ est, de même :
• *Proportionnel à la pression ;*
!• *Indépendant de l'étendue des surfaces de contact.*

frottement au départ est le même que le frottement pendant le ement, lorsque les corps qui glissent l'un sur l'autre sont durs, e les pierres et les métaux. Mais pour les corps compressibles, e les bois, le frottement au départ est très notablement plus . que l'autre. Lorsqu'on pose l'un sur l'autre deux corps, dont moins est compressible, et qu'on cherche ensuite à les faire r, la résistance qu'on éprouve n'est pas toujours la même : arie, suivant que la durée du contact qui a précédé le glisse- a été plus ou moins longue. Pour le glissement de bois sur c'est après un contact de deux ou trois minutes, que le frotte- au départ atteint toute son intensité ; pour le glissement de ur métaux, il faut un temps beaucoup plus long, qui va même ieurs jours. Mais dès le moment que le contact des deux corps uffisamment prolongé, le frottement au départ n'augmente plus la durée du contact.

peut paraître singulier que le frottement, soit au départ, soit nt le mouvement, ne dépende pas de l'étendue des surfaces ntes : il semble au contraire, au premier abord, qu'il devrait roportionnel à cette étendue : mais un raisonnement bien sim- nous rendre compte de ce que l'expérience indique. Suppo- que deux corps, de même poids, s'appuient sur un plan hori- ., par des surfaces de même nature et d'étendues différentes. emière sera, par exemple, double de la seconde. Lorsqu'on fera r ces deux corps sur le plan, le premier frottera par deux fois le points que le second. Mais aussi, son poids se répartissant eux fois plus de points d'appui, on peut regarder les pressions i résultent, sur chacun de ses points, comme étant moitié lres que les pressions correspondantes, produites par le second : le frottement sera donc aussi moitié moindre en chaque point ui, et, en conséquence, si le nombre des points frottants est grand, le frottement, en chacun de ces points, est plus faible, le même rapport, et cela se compense exactement.

égalité de pression, le frottement varie beaucoup, suivant la e des surfaces qui glissent l'une sur l'autre. Voici quelques ré- s d'expérience qui pourront donner une idée de la grandeur ttement qui se développe dans les différents cas.

INDICATION des surfaces en contact.	RAPPORT du frottement à la p	
	au départ.	pe le mo
Bois sur bois, sans enduit, moyennement	0,50	
» avec enduit de savon sec *id*.	0,36	
» avec enduit de suif. . . *id*.	0,19	
Bois sur métaux, sans enduit . . . *id*.	0,60	
» avec enduit de suif. . . *id*.	0,12	
Courroie sur bois, sans enduit. . . *id*.	0,63	
» mouillée d'eau. . . . . *id*.	0,87	
Métaux sur métaux, sans enduit. . *id*.	0,18	
» avec enduit d'huile d'olive *id*.	0,12	

§ 127. **Résistance au roulement.**—Lorsqu'on cherc rouler un corps cylindrique sur une surface plane et horizo éprouve une résistance : cela provient de la déformation q vent le corps et la surfac quelle il s'appuie, en rais pression qui s'exerce au de contact. Le cylindre la surface qui le support prime en forme de sillon, produire le roulement, il f ainsi dire, à chaque insta monter le cylindre sur incliné.



Fig. 178.

Coulomb a fait égale expériences, pour déter lois de cette résistance ment. Il s'est servi, pou moyen suivant. Deux horizontaux, placés à cô l'autre, laissaient entre espace vide, *fig*. 178, un cylindrique était posé tra lement sur ces madrie *pression* qu'il exerçait pouvait être augmentée à volonté, à *ficelles a, a*, portant des poids égaux à leurs extrémités,

nroulée au milieu du rouleau, se terminait par un pla-
s lequel on pouvait mettre différents poids. Dans chaque
, Coulomb mettait dans le plateau *c* des poids suffisants
luire le roulement : ces poids pouvaient servir de mesure
tance au roulement.

it un temps très court, on peut regarder le corps qui roule
urnant autour de la ligne droite par laquelle il s'appuie.
nce dont nous nous occupons s'oppose à ce que ce mouve-
otation se produise, et le corps ne peut se mouvoir qu'au-
la force P, *fig.* 179, fait équilibre à cette résistance : on
la force P agit, pour
xtrémité du bras de
. On pourrait faire
ice autrement, en
nt le poids P par
Q qui tirerait le
horizontalement au
à l'aide d'une corde
sur une poulie : ce
agissant sur un bras
AC, qui est double
levra n'être que la moitié de P, pour mettre le rouleau en
ent, puisque la résistance à vaincre est la même dans les
. Une force qui agirait sur un bras de levier autre que AB
t qui ferait équilibre à la même résistance au roulement,
e valeur différente de P et de Q, qui dépendrait de la gran-
son bras de levier. Il résulte des expériences de Coulomb
rce capable de vaincre la résistance au roulement, force
s supposerons agir toujours sur un même bras de levier,

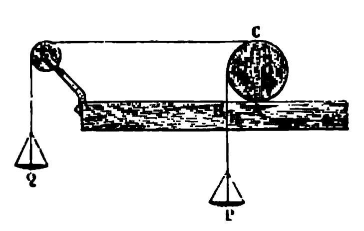


Fig. 179.

portionnelle à la pression ;
lépendante du diamètre du rouleau.
force varie d'ailleurs suivant la nature de la surface du
i roule, et de celle du plan sur lequel se produit le roule-

bien évident que, si la force qui détermine le roulement,
l'agir toujours sur un même bras de levier, était dans tous
ppliquée horizontalement au centre du rouleau, ou bien
mité supérieure de son diamètre vertical, elle serait inver-
proportionnelle à ce diamètre.

. **Roideur des cordes.** — On peut se rendre compte de
nières différentes de la résistance occasionnée par la roi-

deur des cordes. Il est clair d'abord que cette résistanc
que, pour enrouler une corde sur une poulie ou sur u
pour lui donner la courbure convenable à cet enroulen
employer une certaine force; une portion de la puissanc
à la machine sert à produire cet effet, et est entièrem
puisqu'elle ne peut vaincre aucune résistance utile. Ma
l'expliquer encore en observant que les deux brins de
sont pas exactement dans les mêmes conditions. Le brin q
ne prend pas brusquement la courbure de la poulie; il se
gressivement, et il en résulte que la portion de ce brin qu
rectiligne n'est pas dirigée suivant une tangente à la cir
de la poulie, *fig.* 180. La direction de la force résistante,
puissance doit faire équilibre,
plus loin du centre de la pou
la corde était parfaitement flex
force agit sur un plus grand l
vier, et il en résulte que la pui
être plus grande qu'elle n'aura
cela.

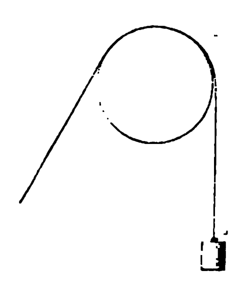


Fig. 180.

La portion de la puissance
sorbée par l'effet de la roideur d
augmente en même temps que l
la corde; mais elle n'augment
portionnellement à cette ter
varie d'ailleurs avec la nature
seur de la corde.

Les courroies sans fin, q
sur des tambours, donnent lieu à des résistances du m

§ 129. **Résistance des fluides.** — Lorsqu'ur
meut dans un fluide, il éprouve, de la part de ce fluide
tance qui tend constamment à diminuer sa vitesse;
comme nous l'avons déjà dit, à ce que le corps comm
mouvement aux molécules du fluide qu'il rencontre.

Si l'on compare cette résistance à celle qui est occa
le frottement, on verra qu'elles sont essentiellement
l'une de l'autre. Lorsqu'on cherche à faire glisser un
une surface, on éprouve une résistance avant que le
ait commencé; cette résistance subsiste pendant le
mais elle est très souvent moindre qu'elle n'était d'abc
ne varie pas d'ailleurs avec la vitesse du corps qui glis

Il n'en est pas de même de la résistance des fluides
le corps qu'on considère n'est pas en mouvement, el

ntir ; elle ne se développe que pendant le mouvement, et
e beaucoup à mesure que le mouvement s'accélère.
us reviendrons plus tard sur cette résistance que les fluides
ent aux corps qui se meuvent à leur intérieur : pour le mo-
, nous nous contenterons de dire qu'elle est proportionnelle :
l'étendue de la surface qui vient directement choquer les mo-
s fluides ; 2° au carré de la vitesse avec laquelle ce choc se
it. Elle est d'ailleurs beaucoup plus grande dans l'eau que
l'air.
ec le petit appareil représenté par la *fig.* 181, on peut montrer

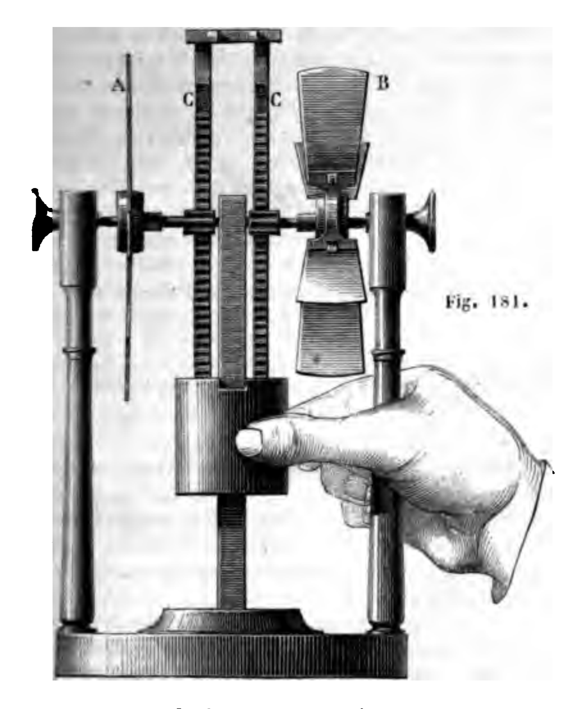


Fig. 181.

a résistance des fluides croît en effet, lorsqu'on augmente l'éten-
le la surface qui rencontre directement les molécules liquides
zeuses. Deux petites *roues* A, B, sont montées chacune sur
e particulier, et sont extrêmement mobiles autour de ces deux

axes. Deux crémaillères, fixées l'une à l'autre, engrènent avec pignons de mêmes dimensions, que portent les axes des roues : en sorte que, si l'on abaisse rapidement les deux cré lères, en agissant comme l'indique la *fig.* 181, jusqu'à ce q n'engrènent plus avec les pignons, qui pourront tourner libr dans les échancrures C, C, on communique aux deux petites exactement la même vitesse de rotation. Chacune des deux est formée de quatre ailettes. Dans la roue A, les ailettes sont à l'axe, et viennent rencontrer l'air seulement par leur tra Dans la roue B, au contraire, les ailettes sont mobiles : elles vent être placées de la même manière que celles de la roue A bien être inclinées plus ou moins sur la direction du mouve elles peuvent même être disposées de manière à rencontrer l' face, pendant qu'elles tourneront. Lorsque les ailettes de la r sont mises dans la même position que celles de la roue A, et fait tourner les deux roues à l'aide des crémaillères, on les v mouvoir pendant un temps très long, et s'arrêter à très pe l'une comme l'autre : mais si les ailettes de la roue B sont disp autrement, comme dans la *fig.* 181, le mouvement de cett se ralentit bien plus vite que celui de l'autre roue, et ce tissement est d'autant plus marqué, que les ailettes se rappr plus de rencontrer de face les molécules d'air qui sont su passage.

ÉTUDE DES MACHINES A L'ÉTAT DE MOUVEMENT N UNIFORME.

§ 130. Lorsqu'une machine est en mouvement, et qu' soumise à des puissances et des résistances qui se font éq son mouvement est uniforme. Mais il en est rarement ainsi, même des machines, en grand nombre, pour lesquelles cela jamais avoir lieu ; c'est ce que l'on comprendra aisément à l' l'exemple suivant.

On emploie souvent, pour faire tourner une meule à aigu disposition représentée sur la *fig.* 182. L'axe de la meule mine par une manivelle ; de l'extrémité de la manivelle p *bielle*, qui descend à peu près verticalement, et dont la part rieure se relie à l'extrémité d'une *pédale*. La bielle est a d'une part avec la manivelle, d'une autre part avec la pédale fait tourner la meule, en agissant directement sur elle avec l on verra la manivelle tourner, la bielle montera et descend

la pédale, et l'ap-
moment où la bielle
lorsque la bielle re-
ne retire pas son
l le soutient, pour
ce pas de pression
e. En même temps
ent ainsi le mouve-
meule, il appuie

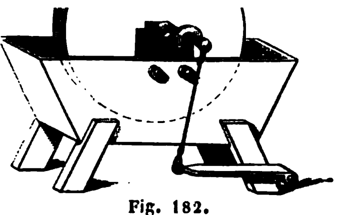


Fig. 182.

ice le corps tranchant qu'il veut aiguiser.
é de reconnaître qu'un pareil mouvement ne peut pas
ne. Si l'on examine ce qui se passe pendant un tour
meule, en commençant au moment où la pédale occupe
la plus élevée, on verra que le pied n'agit que pendant la
oitié de ce tour, et qu'il cesse complétement d'agir pen-
nde moitié. La résistance, au contraire, qui est occa-
le frottement du corps qu'on aiguise, continue son
e manière à peu près régu-
nt le tour entier. Ainsi,
onde moitié du tour, il ne
avoir équilibre entre la
t la résistance, puisque la
st nulle, et que la résistance
s. Dans la première moitié
équilibre n'existe qu'à deux



sur lequel agit la puissance, varie d'un moment à l'autre.
de levier, nul d'abord, lorsque la bielle commence à descen
mente jusqu'à devenir égal à OM ; puis il diminue, et re
lorsque la bielle est sur le point de remonter. La puissance.
sur un bras de levier qui varie à chaque instant, ne peut
constamment équilibre à la résistance. Mais si ce bras d
pendant qu'il augmente, atteint une valeur pour laquelle l'
a lieu, il repassera par la même valeur lorsqu'il diminuera :
que la puissance fera deux fois équilibre à la résistance, p
mouvement descendant de la bielle, qui occupera, à ces d
ments, des positions telles que MN, M'N', *fig.* 183.

Tant que l'extrémité de la manivelle est située entre le p
le point M', la puissance agit sur un bras de levier plus g
celui qui convient à l'équilibre ; une portion de la puissa
pour vaincre la résistance, et l'autre portion donne lieu à u
lération du mouvement de la meule. Mais si, pendant que
descend, l'extrémité de la manivelle se trouve au-dessus du
ou au-dessous du point M, la puissance, ayant un bras de le
faible, ne peut plus faire équilibre qu'à une portion de la re
l'autre portion ralentit le mouvement. Pendant que la bielle
le mouvement se ralentit aussi constamment, puisque la m
plus soumise qu'à la résistance. On voit donc que la vite
meule augmente pendant tout le temps que la manivelle m
de M en M', et qu'elle diminue pendant que la manivelle a
tour, en allant de M' en M. La meule a sa plus petite vitess
la manivelle est en M, et sa plus grande vitesse lorsqu'elle

§ 431. Il y a beaucoup d'ateliers dans lesquels une m
chine motrice, une machine à vapeur, par exemple, fait
un grand nombre de machines-outils, telles que des scies,
chines à raboter, à percer, etc. Habituellement ces machi
ne fonctionnent pas toutes à la fois. Elles reçoivent leur m

nce est trop grande pour qu'il y ait équilibre, le mouvement .ère dans toutes les parties de l'atelier qui communiquent avec uissance: le mouvement se ralentit au contraire lorsque la puis-est trop faible relativement aux résistances qu'elle a à vaincre.

32. **Des volants.**—Il est important, dans la plupart des cas, ulariser autant que possible le mouvement des machines, afin vitesse de chaque pièce n'augmente pas, ou ne diminue pas, à de certaines limites. Voici comment on y parvient.

mouvement d'une machine s'accélère, lorsque la puissance rte sur les résistances à vaincre Mais l'accélération produite a même excès de puissance peut être très différente, suivant ndeur et la disposition des pièces qui y participent. Si l'on fixe achine des corps massifs qui doivent se mouvoir avec elle, et les dispose surtout de telle manière qu'ils aient habituelle-une grande vitesse, on rendra la machine beaucoup moins sen-i l'action de toute force accélératrice. La quantité de mouve-produite par cette force devant se répartir entre toutes les ; qui se meuvent ensemble, chacune d'elles en recevra une n d'autant plus faible qu'on aura donné plus d'importance a asses addition-. La présence reilles masses lonc pour effet ninuer l'accélé-de mouvement it résulter de ; de la puissan-les résistances. même, si la nce vient à être ible pour faire re aux résis-;, l'excès de ces res ralentira le ment de la ma-: mais ce ra-ement se fera oup moins sen-sque la machi-a munie des masses additionnelles dont on vient de parler.

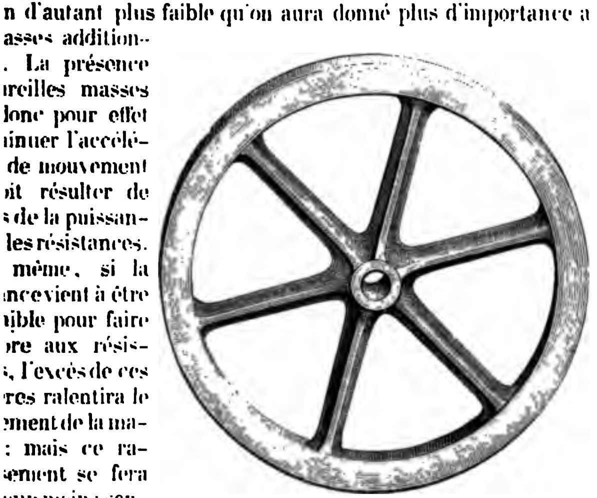


Fig. 184.

donne ordinairement à ces masses additionnelles la forme *roue, comme celle qui est ici représentée, fig.* 184. Cette

roue, montée sur un arbre tournant, participe au mouvement de rotation de l'arbre : pour une même vitesse angulaire, les molécules qui sont à la circonférence ont un mouvement d'autant plus rapide que la roue a un plus grand diamètre. Une pareille roue prend le nom de *volant*.

Quelquefois, au lieu d'une roue, on adapte à l'un des arbres tournants de la machine deux ou trois rayons terminés par des masses de fonte, *fig*. 185 et 186. On donne à ces masses la forme de lentilles, pour diminuer la résistance que l'air oppose à leur mouvement, résistance qui pourrait être très grande, en raison de la grandeur de leur vitesse. Ces masses lenticulaires sont d'ailleurs disposées de telle manière que le centre de gravité de l'espèce de volant qu'elles forment soit situé sur l'axe de rotation de l'arbre.

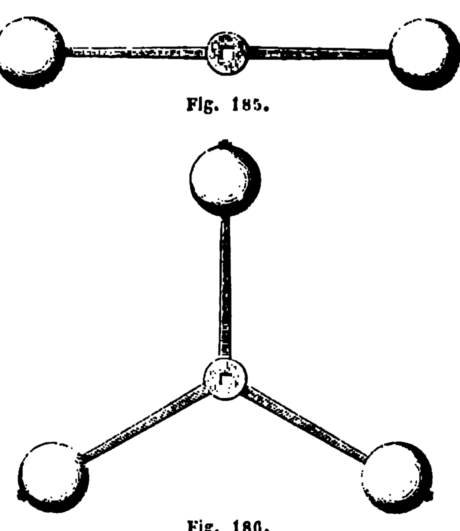


Fig. 185.

Fig. 186.

L'addition d'un volant à une machine ne nécessite pas l'emploi d'une plus grande puissance pour entretenir son mouvement. Que la machine soit munie ou non d'un volant, si les résistances à vaincre sont les mêmes, on devra employer la même puissance. Le volant n'a d'autre effet que de resserrer les limites entre lesquelles peut varier la vitesse de la machine, suivant que la puissance l'emportera sur les résistances, ou inversement.

Pour être exactement dans le vrai, nous devons dire cependant que, quand on adapte un volant à un arbre tournant, le poids du volant détermine une plus grande pression de l'arbre sur ses supports : il en résulte donc des frottements plus grands que si le volant n'existait pas, et la puissance qui est appliquée à la machine doit être

en conséquence, pour pouvoir vaincre ces frottements.
:ette raison seulement que l'addition d'un volant à une
:essite l'emploi d'une plus grande puissance; mais l'aug-
ui en résulte est tellement faible, qu'on peut la négliger.
augmenter la puissance d'un volant, soit en augmentant
sans changer sa forme, soit en lui donnant de plus
nensions, sans faire entrer plus de matière dans sa com-
est ce dernier moyen qu'on emploie de préférence, afin
endre le volant trop lourd, et par suite de ne pas trop
bre qui doit le supporter. Aussi voit-on habituellement
hines un peu puissantes sont munies de volants de très
nensions. Il y a cependant une limite qu'on ne doit pas
i l'on agrandissait un volant outre mesure, sans aug-
poids, sa circonférence ne présenterait plus une solidité
et pourrait être brisée par la force centrifuge qui se
endant son mouvement de rotation (§ 111).

Régulateur à force centrifuge. — Un volant régula-
rement d'une machine, en empêchant que les inégalités
: dans l'action de la puissance et des résistances ne pro-
trop grande accélération, ou un trop grand ralentissement
e; mais il y a beaucoup de circonstances dans lesquelles
fit pas. Si les résistances que la machine doit vaincre
iminuer très notablement, et que la puissance se trouvât
stant trop grande pour leur faire équilibre, le mouvement
it constamment. Le volant pourrait bien empêcher que la
'accrût trop rapidement; mais, malgré son action, elle
it sans cesse, et pourrait devenir excessivement grande,
aînerait de graves inconvénients, dont le moindre serait
travail de la machine. Si, au contraire, les résistances
nt de manière que la puissance ne fût, à aucun instant,
leur faire équilibre, le mouvement de la machine se
e plus en plus, malgré la présence du volant, qui ne ferait
r ce ralentissement, et bientôt la machine s'arrêterait.
lispensable, dans de pareilles circonstances, de modifier
qui agissent sur la machine, c'est-à-dire d'augmenter ou
r, soit la puissance, soit les résistances à vaincre, afin de
mouvement à un état normal. On ne peut pas, ainsi que
is vu (§ 130 et 131), faire en sorte qu'il y ait constam-
ibre entre la puissance et les résistances; mais on doit
égler les diverses forces de manière que, le mouvement
t et se ralentissant *successivement*, la vitesse ne s'éloigne
ucoup de celle qui convient au meilleur travail de la ma-

chine. Pour atteindre ce but, on emploie avec beaucoup d'av
le *régulateur à force centrifuge*, *fig.* 187.

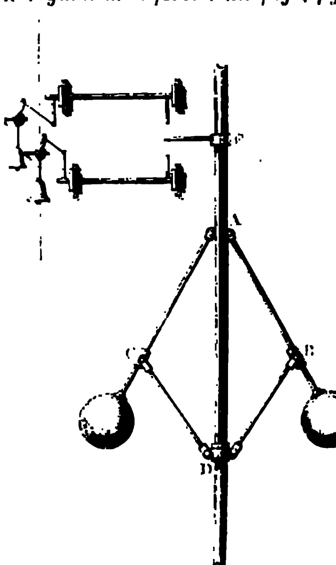


Fig. 187.

Il se compose essei
ment de deux boules n
ques fixées aux ext
de deux tiges AB, A(
tiges sont attachées, e
un arbre vertical AD,
la machine communic
mouvement de rotation
peuvent d'ailleurs tourn
tour de leurs points d'a
de manière à faire des
plus ou moins grand
l'arbre AD. Deux autr
sont articulées, d'une p
B et C aux deux précé
et d'une autre part à
neau D qui enveloppe
vertical, et peut mon
descendre librement
de cet arbre. Si l'on éc
deux boules l'une de
avec les mains, le
ABDC se déforme, sa
nale AD se raccourcit
conséquence l'anneau D monte : cet anneau D s'abaisserait,
traire, si, au lieu d'écarter les deux boules, on les rapprocha
de l'autre.

L'arbre vertical recevant un mouvement de rotation de la n
à laquelle le régulateur est adapté, les deux boules tourn
même temps. Chacune d'elles est soumise à son poids et à
centrifuge développée par le mouvement de rotation ; elle
de l'arbre tournant, jusqu'à ce que la résultante de ces deu
soit dirigée suivant le prolongement de la tige à laquelle
fixée. Si le mouvement de la machine s'accélère, les boules
ront plus vite ; la force centrifuge augmentera, et les boules
teront. Elles se rapprocheront, si le mouvement de la mac
ralentit. Il en résulte que l'anneau D montera ou descendra,
que la rapidité du mouvement de la machine sera plus ou moins g
C'est ce mouvement ascendant ou descendant de l'anneau I
met à profit, pour agir, soit sur la puissance, soit sur les rési

[redacted]

ıs, le régulateur agit de lui-même sur la puissance
ı machine, en diminuant sa grandeur lorsque le
ɔp rapide, et l'augmentant lorsque la vitesse est
ce qui a lieu notamment dans les machines à
ous le verrons plus tard. Dans d'autres cas, le
que prévenir l'ouvrier qui dirige la marche de la
ıdiquant si le mouvement est trop rapide ou trop
ɪeut alors modifier la grandeur de la puissance, et
ort avec les résistances à vaincre, de manière à
ɪe entre les limites dont elle ne doit pas sortir. La
ne disposition qui est employée dans les moulins à
destinée à produire l'effet dont nous venons de
lieu. L'anneau D est surmonté de deux tringles
ne seule est visible sur la figure, et qui se termi-
. Ce second anneau, se trouvant ainsi lié au pre-
ous les mouvements: il s'élèvera ou s'abaissera,
uvement de la machine sera trop rapide ou trop
E, qui tourne en même temps que le régulateur,
rizontal placé de manière à ne rien rencontrer
ent, tant que la machine marche avec une vitesse
, dès que la vitesse de la machine devient trop
tite, ce doigt vient, à chaque tour, choquer un
it sonner une sonnette. Les deux sonnettes, dont
a machine va trop vite, et l'autre quand elle va
ıt des timbres différents, afin qu'on puisse distin-
dans quel sens on doit modifier la grandeur de
fait mouvoir la machine.

mission du travail dans une machine. —
récédemment (§ 80), que lorsqu'une machine est
vement uniforme, le travail moteur et le travail
ts pendant un même intervalle de temps, sont
Il ne peut plus en être de même, dans le cas où
achine change à chaque instant.
ıvement s'accélère, il faut que la puissance l'em-
tances; une partie seulement de la puissance leur
l'autre partie augmente la vitesse de la machine.
produit par la première partie est égal au travail
ıisque, si elle existait seule, le mouvement serait
donc que le travail moteur, dû à la puissance tout
le travail résistant total de tout le travail que pro-
ırtie de la puissance.
ıvement se ralentisse, il faut que les résistances

l'emportent sur la puissance. Celle-ci ne fait plus équilibre
portion des résistances, et le travail moteur est égal au trav
tant dû à cette portion seulement. Le travail résistant total
donc le travail moteur de toute la quantité de travail corre
à la portion excédante des résistances.

Ainsi le travail moteur est tantôt plus grand, tantôt plus
le travail résistant produit pendant le même temps, suiva
mouvement de la machine s'accélère ou se ralentit. Mais,
on admettra sans peine que l'excès de travail moteur, q
lieu à une certaine accélération du mouvement, est pré
égal à l'excès de travail résistant qui détruit cette accéléra
ramenant le mouvement à ce qu'il était primitivement. On
effet, que si une force, appliquée à une machine, et n'ayan
résistance à vaincre, produisait une certaine augmenta
vitesse, il suffirait d'appliquer ensuite cette force en sens co
pendant le même temps, ou bien d'autres forces dont l'e
lui serait équivalent, pour que la vitesse se trouvât rédu
qu'elle était d'abord; et il est clair que le travail moteur d
dans le premier cas est égal au travail résistant développé
second, puisque, si ces forces agissaient simultanément su
chine, elles se feraient équilibre. On peut donc dire que, lo
machine se trouve, à deux instants différents, animée de l
vitesse, quels que soient les changements que sa vitesse a p
ver dans l'intervalle, il y a eu compensation exacte entre l
successifs du travail moteur et du travail résistant; en sor
travail moteur total, produit pendant tout cet intervalle de
est égal au travail résistant total produit pendant le même i
de temps. Cela aura lieu encore, si l'on prend la machine
moment où elle commence à se mouvoir jusqu'à celui où el
à l'état de repos.

Habituellement, lorsqu'une machine ne peut pas, par s
prendre un mouvement uniforme, comme la meule de ré
(§ 130), elle prend un mouvement qu'on appelle *régulier*
diquement uniforme; les accélérations et les ralentissem
mouvement se succèdent périodiquement, de manière que,
les diverses pièces de la machine repassent par les mêmes p
elles y sont animées des mêmes vitesses. C'est ce qui a lieu
meule de rémouleur, lorsqu'il s'est déjà écoulé quelqu
depuis qu'elle a été mise en mouvement; à la fin de cha
qu'elle fait, elle reprend la vitesse qu'elle avait au comme
de ce tour. Dans un pareil cas, l'égalité du travail moteur e
vail résistant a lieu pendant chacune des périodes du mo

[redacted]

› le temps qui s'écoule, depuis le moment où la
e à marcher, jusqu'au moment où son mouve-
gulier, on trouvera que le travail moteur est plus
ùl résistant; l'excès du premier sur le second a
ıer à la machine le mouvement qu'elle possède à
ılle de temps. Pendant tout le temps de la marche
hine, le travail moteur sera précisément égal au
lais, lorsque la machine quittera son mouvement
ır à l'état de repos, le travail résistant deviendra
ravail moteur, et il le surpassera de toute la quan-
: été surpassé pendant les premiers instants de la
ıine; en sorte que, comme nous l'avons déjà dit,
produit pendant toute la durée du mouvement,
résistant correspondant.

des volants. — Toutes les fois que le travail
ınd que le travail résistant, l'excès du premier sur
'orme en mouvement, et il y a accélération dans la
ne; c'est pour que cette accélération ne devienne
u'on emploie les volants. Mais si un volant dimi-
ıt de la vitesse, il ne diminue pas pour cela l'effet
cet accroissement. Le surcroît de mouvement,
é par la prépondérance du travail moteur sur le
se répartit sur une plus grande masse que si le
ıs, et c'est ce qui fait que la vitesse ne change pas
ırcroît de mouvement, qui s'accumule en grande
se du volant, sans que la vitesse de la machine
lement modifiée, n'en est pas moins capable de
'oduction de la même quantité de travail résistant.
,ue, on peut dire qu'*un volant est un réservoir de*
e travail moteur l'emporte sur le travail résistant,
· sur le second s'emmagasine dans le volant, sous
ent; et lorsque l'occasion s'en présente, ce tra-
'e, donne lieu à la production d'une quantité égale
t.

› est muni d'un volant, il faudra une plus grande
re en mouvement, et lui faire acquérir une vitesse
i le volant n'existait pas; l'excès du travail moteur
ant, pendant les commencements de la marche de la
› plus grand qu'il n'aurait été sans cela. Mais nous
ıxcès de travail moteur n'est pas perdu; il est uti-
ırs moments de la marche de la machine, et donne
oduction d'une quantité égale de travail résistant.

§ 136. **Influence des résistances passives.** —]
ce que nous avons dit jusqu'ici, relativement aux machi
avons toujours fait abstraction des frottements entre le
pièces, et en général de ce que nous avons appelé les *r*
passives (§ 123). Les résultats que nous avons obtenus
besoin d'être complétés, sous ce rapport, pour ne rien
désirer. Or, ce complément est bien simple : il suffit, er
regarder les résistances passives comme faisant partie d
tances qui doivent être vaincues par la puissance, et tou
été trouvé précédemment devient entièrement exact.

En étudiant diverses machines, sous le point de vue d
bre des forces qui leur sont appliquées, nous avons vu
dans chaque cas, on pouvait trouver la grandeur de la
capable de faire équilibre à la résistance. Pour évaluer ex
cette puissance, on devra tenir compte, non-seulement de
tance que la machine est destinée à vaincre, mais encor
sistances passives de toute espèce occasionnées par l'emplo
machine : la puissance nécessaire pour que la machine s
d'équilibre sera donc toujours plus grande que si ces ré
passives n'existaient pas.

En considérant les machines à l'état de mouvement
nous avons reconnu que le travail moteur était toujour
travail résistant. Nous sommes arrivés au même résulta
cas du mouvement non uniforme d'une machine, à la cond
valuer les quantités de travail pendant un intervalle de
commencement et à la fin duquel la machine se trouve ani
même vitesse. Cette égalité du travail moteur et du travail
subsistera encore, quand nous ne négligerons plus les ré
passives, pourvu qu'en évaluant le travail résistant, nou
prenions celui qui correspond à ces résistances passives.

Les résistances qu'on doit considérer dans l'étude d'une
en mouvement sont donc de deux espèces : les unes sont
tances utiles, celles que la machine a pour objet de vai
autres sont les résistances passives. La portion du travail
total, qui correspond aux premières, prend le nom de *tra*
et le principe de la transmission du travail s'énonce de la
suivante : *Le travail moteur est égal au travail utile, au*
travail dû aux résistances passives.

Il est en général très facile, comme nous l'avons vu da
ragraphes 53 à 66, de trouver la grandeur de la puissanc
de faire équilibre à une résistance donnée, par l'intermédia
machine, quand on ne tient pas compte des résistances

'en est plus de même lorsqu'on veut en tenir compte. Ces
;es passives sont habituellement difficiles à évaluer. Celles
entent le moins de difficultés sous ce rapport, et qui ont en
mps une plus grande influence que les autres, surtout lors-
nachine n'est pas animée d'une trop grande vitesse, ce sont
tements. Les expériences nombreuses qui ont été faites
déterminer les lois et la grandeur permettent de les éva-
ez exactement : cependant il reste toujours quelque incer-
ur leur grandeur, en raison de ce que les surfaces des corps
tent ne sont pas identiquement les mêmes que celles qu'on
ises à l'expérience, et aussi en raison de ce que les pressions
occasionnent ne peuvent pas toujours être complétement
s. Mais les forces de frottement, dont on doit tenir compte
ne machine, sont ordinairement assez nombreuses : elles se
ppent entre les dents des engrenages, entre les tourillons
bres tournants et les coussinets qui les supportent, etc. En
que, si l'on veut calculer la grandeur de la portion de la puis-
qui fait équilibre à toutes ces forces de frottement, on est en-
dans une grande complication. D'ailleurs, outre les frotte-
s, il existe encore d'autres résistances passives auxquelles la
ine est soumise, et qui ne peuvent, la plupart du temps, être
lées qu'avec une grossière approximation. On voit donc qu'on
oit pas espérer de déterminer exactement la grandeur de la
ance capable de faire équilibre à toutes ces résistances, à moins
a machine ne soit d'une grande simplicité.

ar la même raison, il sera très difficile de calculer exactement la
itité de travail résistant occasionnée par les diverses résistances
ives, pendant un intervalle de temps quelconque, afin de voir
ombien le travail moteur surpasse le travail utile, pendant ce
ps.

)n devra donc se contenter de savoir que, pour vaincre une même
stance utile, il faudra une puissance d'autant plus grande, que
résistances passives auront une plus grande influence ; que pour
duire une même quantité de travail utile, il faudra développer
quantité de travail moteur d'autant plus considérable, que le
ail dû aux résistances passives sera plus grand. Dans la con-
ction d'une machine, on devra toujours se proposer de diminuer
ant qu'on pourra l'influence des résistances passives, afin d'em-
yer la plus petite quantité possible de travail moteur, à la pro-
tion d'une quantité donnée de travail utile. Sous le point de vue
'économie des forces, la *perfection* d'une machine consistera
s *la grandeur du rapport qui existera* entre le travail utile et le



travail moteur; ce rapport, qui constitue ce qu'on nomme le rende de la machine, est toujours inférieur à l'unité: mais la machine d'autant plus parfaite, qu'il approchera davantage d'être égal

§ 137. **Moyens de diminuer l'influence des résista passives.** — Pour arriver à diminuer l'influence des résista passives, on emploie différents moyens que nous allons faire con tre, en passant en revue les diverses espèces de résistances qui été indiquées précédemment.

Le travail dû au frottement de deux pièces qui glissent l'une l'autre dépend à la fois de la grandeur de la force de frottem et de la grandeur du chemin que parcourt son point d'applica c'est-à-dire de l'étendue du glissement. Pour diminuer ce trav résistant, on pourra agir sur chacun des deux éléments dont il compose. On diminuera d'abord la grandeur du frottement, en ch sissant convenablement les matières dont on devra former les piè destinées à glisser l'une sur l'autre; en polissant les surfaces ces pièces, et en les entretenant constamment lubrifiées d'huile de graisse. D'un autre côté, on réduira autant que possible l'éte due du glissement, en adoptant des formes convenables pour pièces entre lesquelles ce glissement doit se produire.

C'est ainsi que les arbres, qui doivent recevoir un mouvement rotation, sont habituellement terminés par des tourillons de fer d' petit diamètre, *fig.* 188. Pendant que l'arbre fait un tour entier, point d'application la force de frottem du tourillon sur coussinet parcourt circonférence du tou lon; le chemin parcou par ce point est d d'autant moindre que diamètre du tourill

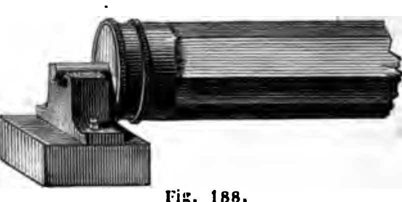


Fig. 188.

est plus petit. On diminue en conséquence ce diamètre, auta qu'on le peut, sans que le tourillon cesse d'être assez résistant p ne pas se rompre sous la pression qu'il a à supporter.

C'est encore pour le même motif que l'on forme les engrenag en armant les roues de dents petites et nombreuses: car plus l dents sont grandes, plus l'étendue du glissement de ces den les unes sur les autres est considérable. On n'est arrêté, dans l petitesse qu'on donne aux dents, que parce qu'elles doivent comme les tourillons, conserver une solidité suffisante pour ne p se briser.

ur atténuer, autant que possible, l'effet produit par la roulement, on fait disparaître les aspérités des corps ouler les uns sur les autres, et, de plus, on fait en sorte n de la puissance qui fait équilibre à la résistance au gisse à l'extrémité d'un grand bras de levier.

; diminuer le travail résistant produit par la roideur des employant des cordes très flexibles. Sous ce rapport, i ont déjà servi sont bien préférables aux cordes neuves.

r soustraire, autant qu'on peut, les machines à la ré- fluides (l'air ou l'eau) au milieu desquels elles se meu- ne aux pièces qui doivent éprouver le plus directement nce une forme telle qu'elles y échappent en grande ièces sont disposées de manière à n'offrir qu'une faible 'encontre du fluide; en outre, elles présentent, du côté it, des angles très aigus, de manière à fendre facilement C'est pour ce motif, ainsi que nous l'avons déjà dit, que, iple à certaines machines des volants formés de deux terminés par des masses métalliques (§ 132), on donne la forme de lentilles aplaties qui viennent choquer l'air iche; c'est encore pour atteindre le même but, qu'on elquefois les boules du régulateur à force centrifuge les lentilles disposées également de manière à rencon- leur tranche.

itre les moyens qui viennent d'être indiqués, dans les aphes qui précèdent, et qui ont pour objet de diminuer ossible l'influence de chacune des résistances passives, iger la nature, on a encore recours à un autre moyen : il consiste à remplacer, dans certains cas, la résistance it, ou le frottement, par la résistance au roulement. is que deux pièces, destinées à glisser l'une sur l'autre, telles conditions qu'il doive se développer entre elles ressions, il y a avantage à modifier leur disposition de mplacer le glissement par un roulement : on change pai le la résistance passive qui doit se développer au contact pièces, et il en résulte une diminution considérable de travail occasionnée par cette résistance.

vons donner comme exemple les roulettes qu'on dis- pieds des meubles, et qui permettent de les déplacer ent sans les soulever. Si ces roulettes n'existaient pas, soin d'appliquer au meuble une force beaucoup plus r le *faire glisser. Lorsque* le mouvement doit s'effec- *dans une même direction*, comme pour les lits, les

axes des roulettes sont fixés aux pieds, perpendiculairement à la direction du mouvement, *fig.* 189. Mais lorsque le mouvement doit pouvoir se faire dans toutes les directions, comme pour les tables ou les fauteuils, l'axe A de la roulette, *fig.* 190, est fixé à une chape B, qui peut elle-même tourner autour d'un axe vertical CD. Lorsqu'on cherche à déplacer le pied qui porte une pareille roulette, la chape commence par tourner autour de CD, de manière à porter la roulette dans le sens opposé à celui dans lequel doit s'effectuer le mouvement ; puis la roulette tourne autour de son axe A, en roulant sur le parquet.

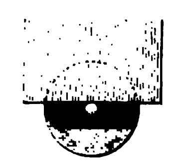


Fig. 189.

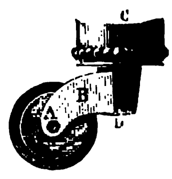


Fig. 190.

Les roulettes qu'on emploie dans les machines, pour substituer le roulement au glissement, sont ordinairement appelées *galets*. Nous en avons vu un exemple dans la grue qui est figurée à la page 64. L'axe vertical PP de la grue présente une partie cylindrique R, à l'endroit où il sort du massif de maçonnerie. Cette partie, qui doit tourner dans une ouverture circulaire de même diamètre, exerce une très grande pression contre les bords de cette ouverture : il est donc très important que, dans le mouvement qu'on donnera à la grue autour de son axe vertical, il se produise un roulement au lieu d'un glissement, afin qu'on n'éprouve pas une trop grande difficulté à la faire tourner. C'est pour cela qu'on a disposé, tout autour de la partie cylindrique R, des galets S, S, montés sur une même chape mobile, comme le montre la *fig.* 191. Lorsque la grue tourne, chaque galet roule entre la surface cylindrique R, et une autre surface cylindrique concave, qui est scellée dans la maçonnerie. Les axes des galets ne *restent pas* immobiles, ils entrainent la chape qui les réunit, et lui *communiquent* un mouvement de rotation qui est plus lent que celui

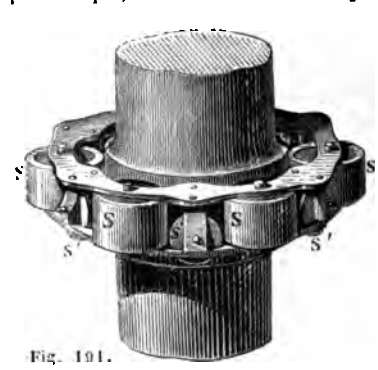


Fig. 191.

. L'ensemble des galets et de leur chape forme une es-
neau qui a besoin d'être soutenu inférieurement, puisqu'il
à rien : il repose pour cela sur une surface plane et an-
ui fait partie du massif, et, pour éviter le frottement de la
rieure de la chape sur cette surface, on lui a adapté d'au-
ets S′, S′, à axes horizontaux, par lesquels s'appuie tout
il qui nous occupe en ce moment.

. la machine d'Atwood, décrite précédemment (page 95), la
qui est à la partie supérieure a besoin d'être extrêmement
: pour que les expériences faites avec cette machine présen-
ın certain degré d'exactitude, il faut que les effets soient
és le moins possible par les résistances passives. Pour y
nir, on a imaginé un mode particulier de suspension de la
e, que nous allons décrire. La poulie A, *fig.* 192, est traversée
on centre par un axe cylindri-
de petit diamètre, qui fait
ps avec elle. Si cet axe avait
posé dans deux coussinets, il
ait éprouvé un frottement, pen-
nt que la poulie aurait tourné :
is, au lieu de cela, on a placé
icune de ses deux extrémités
is l'angle formé par les circon-
ences de deux roues B, B, qui
t placées à côté l'une de l'au-
, de manière à se recouvrir en
tie. Lorsque la poulie tourne,
axe roule sur les quatre roues
B, sans changer pour cela de
ition ; le glissement qui aurait
lieu, si l'axe avait reposé sur
x coussinets, se trouve ainsi

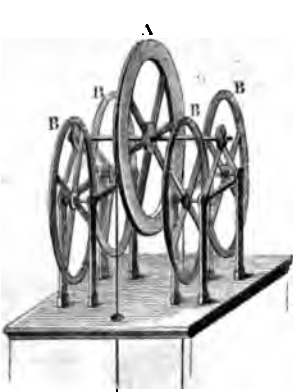


Fig. 192.

ıplacé par un roulement, et la résistance que la poulie éprouve
beaucoup moindre. Il se produit cependant encore des frotte-
nts entre les axes des roues B, B, et leurs supports ; mais ces
tements n'ont qu'une influence insensible sur le mouvement de
oulie, en raison du faible chemin que parcourent leurs points
pplication, pendant que la poulie fait un tour entier (§ 72). L'axe
la poulie A, s'appuyant, comme nous venons de le dire, sur les
tre roues B, B, pourrait encore glisser sur ces roues dans le
s *de sa longueur, et déplacer ainsi* la poulie, ce qui nuirait aux
riences : pour empêcher ce mouvement, on a terminé l'axe y

deux pointes fines, à ses deux extrémités, *fig.* 193, et l'on a d
deux petits plans d'acier, contre lesquels ces deux pointes vi
butter, ce qui maintient l'axe dans une position invariable.

Enfin nous donnerons, comme dernier exemple de la subst
du roulement au glissement, le mode de suspension de la
cloche de Metz, qui fonctionne depuis
quatre cents ans. Le mouton de cette
porte deux tourillons cylindriques, autou
quels la cloche doit tourner, lorsqu'on la f
ner. Si ces tourillons reposaient dans des
sinets ordinaires, ils éprouveraient des
ments qui tendraient à diminuer le
ment de la cloche ; en sorte qu'il faudr
ployer une plus grande force pour ent
l'amplitude de ses oscillations. Mais, au
cela, on a appuyé chaque tourillon sur
teur A, *fig.* 194, mobile autour de son point d'appui infér
et terminé supérieurement par un arc de cercle dont le cen

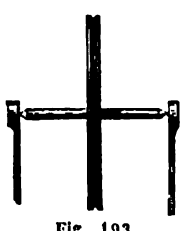


Fig. 193.

à ce point d'appui.
que la cloche est en
vement, le tourillon
sur ce secteur, qui
en même temps au
son point d'appui
secteur s'incline, t
droite, tantôt à g
suivant que la clo
elle-même à droite
gauche. Pour main
tourillon toujours
sus du point d'ap
secteur A, on a disp
part et d'autre, de
ces B, C, desti
l'empêcher de se d
latéralement. Si ce
pièces étaient fixes, il en résulterait encore, à certains mo
un frottement sur le tourillon ; aussi a-t-on donné à ces p
forme de secteurs, et les a-t-on rendues mobiles autour des
b, *c*, de manière à remplacer encore le glissement du to
sur leur surface par un roulement. Le tourillon étant t
appuyé sur le secteur A, il en résulte une adhérence qui

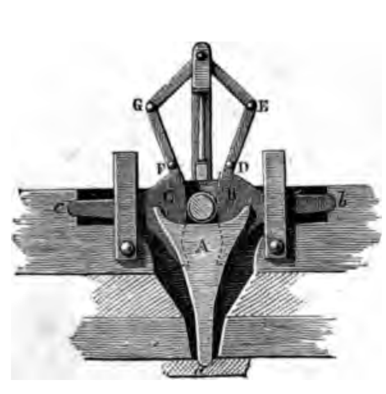


Fig. 194.

[redacted]

tourne nécessairement en même temps que le tou-
que la cloche est au repos, le tourillon repose tou-
de l'arc de cercle qui termine ce secteur. Mais il
même pour les deux autres secteurs B, C; le tou-
alternativement sur l'un et sur l'autre, et l'on ne doit
ir l'adhérence de leurs surfaces avec le tourillon,
tenir constamment dans une position convenable :
urs sont-ils soutenus par les tiges DE, FG, articulées,
D et F avec les secteurs, et d'une autre part, en E
irtie supérieure du mouton. Pendant le mouvement
e haut du mouton s'incline, tantôt d'un côté, tantôt
es secteurs B, C, se meuvent en même temps, en
baissant alternativement; les choses ont été disposées
'e, que les mouvements de ces secteurs soient les
s avaient été produits par le roulement du tourillon
ces.

yens d'augmenter l'influence des résistances
Habituellement, on doit toujours chercher à atténuer
ssible l'action des résistances passives, afin de pro-
u'on peut de travail utile, avec une quantité donnée
teur : mais il y a des circonstances exceptionnelles
on a besoin, au contraire, d'augmenter cette action,
érer la marche de la machine, soit même pour l'ar-
it. On y arrive en créant des frottements qui n'exis-
a marche régulière de la machine; les pièces qui sont
oduire ces frottements sont désignées en général sous
ins. Nous nous contenterons, pour le moment, de
e exemple le frein qu'on adapte ordinairement aux
odérer le mouve-
renages, dans le
it faire descendre
ii a été soulevé,
gé de tenir con-
manivelles. Ce
en une lame de
qui enveloppe à
plétement un tam-
que fixé latérale-
es roues dentées.

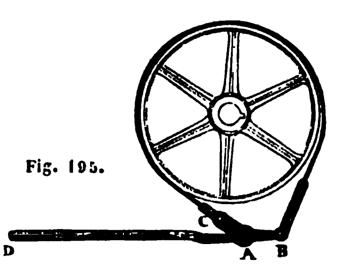


Fig. 195.

nbour sur la *fig*. 81, page 64; il est à gauche de
c laquelle il fait corps. Les deux bouts de la lame
'tachés aux extrémités B, C, des deux petits bras



d'une espèce de levier à trois bras BCD, qui peut tourner :
du point fixe A. Lorsqu'on vient à soulever le grand bras du l
la lame de tôle se trouve serrée contre la surface du tambour
à son intérieur, et, si ce tambour tourne, il éprouve un frott
d'autant plus considérable, qu'on agit plus fortement pour sou
l'extrémité D du levier. Lorsqu'on ne veut pas produire ce fi
ment, on laisse retomber le grand bras du levier, la lame n'es
serrée contre le tambour, et, si elle le touche encore en que
points, il n'en résulte qu'un faible frottement. Pendant tout le t
qu'on fait tourner les manivelles de la grue, pour soulever un
deau, le frein ne fonctionne pas : mais lorsque ce fardeau, :
avoir été élevé, se trouve amené, par la rotation de la grue,
dessus de l'endroit où l'on veut le déposer, on abandonne les n
velles : le fardeau descend en vertu de son poids, en faisant t
ner les roues en sens contraire, et on ne laisse pas croître sa vi
au delà d'une certaine limite, en agissant sur le frein, de ma
à faire équilibre au poids du fardeau par le frottement qui se d
loppe.

Nous trouverons, plus tard, l'occasion d'indiquer d'autres f
qui sont destinés à produire des effets analogues à celui dont
venons de parler.

Lorsqu'il existe dans une machine une pièce qui roule sur
autre, on en profite quelquefois pour augmenter au besoin les r
tances passives. Pour cela, on empêche cette pièce de rouler : e
peut donc continuer à se mouvoir qu'en glissant, et la résis
qui provenait du roulement est remplacée par un frottement

§ 141. Pour pouvoir indiquer un moyen de produire rapid
une très grande résistance, nous allons étudier le frottement
lieu entre un cylindre fixe e
corde qui glisse sur sa surface

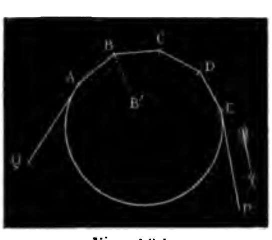


Fig. 196.

Soit AE, *fig.* 196, la porti
contour d'un cylindre sur la
glisse une corde, dans le se
la flèche : la corde est soumise
part à la force P, qui tire dans
du mouvement, et d'une autr
à la force Q, qui résiste et t
sens contraire. Le mouvemen
uniforme, la force P est égal
force Q augmentée de tout le
ment qui se développe le long de l'arc AE. Pour concevoi
ment ce frottement est produit, imaginons que l'arc AE s

sieurs parties AB, BC, ..., assez petites pour pouvoir être lées comme de petites lignes droites; l'arc AE sera assipar là, à une portion de polygone sur laquelle la corde glisse. À un sommet quelconque B, aboutissent deux cordons BC, ont les tensions diffèrent l'une de l'autre de la grandeur du nent produit sur ce point même; ces deux tensions, très ifférentes, ont une résultante dirigée suivant BB', qui est la on exercée par la corde sur le sommet B, et c'est cette presqui détermine le frottement en B. On voit par là que la tension corde va en augmentant constamment, depuis le point A où elle gale à Q, jusqu'au point E où elle est égale à P: et que, de elle n'augmente pas uniformément, puisque le frottement, en ue point, est d'autant plus grand que la tension y est elle-e plus considérable.

ur trouver la loi suivant laquelle varie la tension de la corde, la portion de sa longueur qui s'applique sur le contour du dre, imaginons que, l'arc de contact étant toujours AE, *fig*. 196, sistance Q devienne double de ce qu'elle était : en doublant la P, elle fera encore équilibre à la force Q et aux frottements se développent. Car les tensions se trouveront toutes doublées. ressions que ces tensions déterminent en B, C, seront doubles e qu'elles étaient; les frottements, qui sont proportionnels aux sions, seront donc également doubles de ce qu'ils étaient : en que la force P, après avoir été doublée, sera bien encore égale force Q augmentée des forces de ement, forces qui sont toutes deux plus grandes que précédemment. on rendait la force Q triple, quadle,... de ce qu'elle était d'abord, udrait que la force P eût une vatriple, quadruple,... de sa valeur itive, pour qu'il pût toujours y r équilibre entre ces deux forces s frottements développés.



Fig. 197.

oit AD, *fig*. 197, l'arc total emsé par une corde qui glisse sur cylindre : divisons cet arc en parties égales AB, BC, CD. La ion AB de la corde se trouve emment *dans les mêmes condi- que si la corde, commençant* à s'enrouler en A, se détachait *suivant BB', et était soumise* en B' à une force de traction

égale à la tension qui existe au point B. De même la p
se comporte comme si la corde, commençant à s'enrou
se détachait en C, et était soumise en B'', et C', à des force
tivement égales aux tensions qui existent en B et C. Enfin,
vons également regarder la portion CD comme apparten
corde qui commencerait à s'enrouler en C, se détacherai
serait soumise, à une de ses extrémités C'', à la tension qu
point C, et à l'autre extrémité à la force P. Admettons, p
les idées, que le frottement qui se développe le long de
soit précisément égal à la force Q : la force appliquée sur
c'est-à-dire la tension au point B, pour faire équilibre à ce f
et à la résistance Q, devra être double de cette résistance.
appliquée en B'', à la corde B''BCC', sera donc double de
l'arc BC est exactement le même que l'arc AB : il en résult
ce que nous avons vu, il n'y a qu'un instant, que la force
en C' devra être double de celle qui est appliquée en B', c'
que cette force, ou bien la tension en C, sera égale à qua
force Q. Enfin, par la même raison, la force appliquée en
quadruple de la force Q, la force P ne pourra lui faire
qu'autant qu'elle sera égale à huit fois la force Q. En re
nous prenons, sur la portion enroulée de la corde, des point
tels que leurs distances au point A croissent en progressio
métique, les tensions de la corde en ces différents points
comme les termes d'une progression géométrique. On peu
core que, si la corde, soum
même résistance Q, embras
lindre successivement le lon
croissant comme les term
progression arithmétique, la
devra, pour faire équilibre
sistance, avoir des valeurs
comme les termes d'une pro
géométrique. Supposons, pa
ple, que, la corde embrassa
lindre suivant un certain
fig. 198, la force P doive, p
équilibre à la résistance Q, ê
à 3 fois cette résistance ; ell
être égale à 9 fois la même

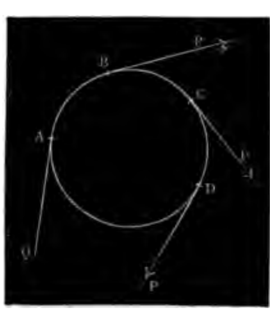


Fig. 198.

tance, dans le cas où la corde toucherait le cylindre le l
arc double AC ; elle devrait être égale à 27 fois la résistan
corde touchait le cylindre le long d'un arc triple, et ains

.. On profite souvent de la grandeur du frottement déve-
ans le glissement d'une corde sur un cylindre fixe, pour une résistance convenable à un mouvement qu'on veut ', ou même arrêter complétement. C'est ainsi que, pour un bateau qui se meut sur une rivière, on saisit une corde e extrémité est attachée au bateau, et on lui fait faire deux tours autour d'une pièce de bois cylindrique fixée verticale-ans le sol, *fig.* 199 ; il suffit ensuite de tirer l'extrémité libre

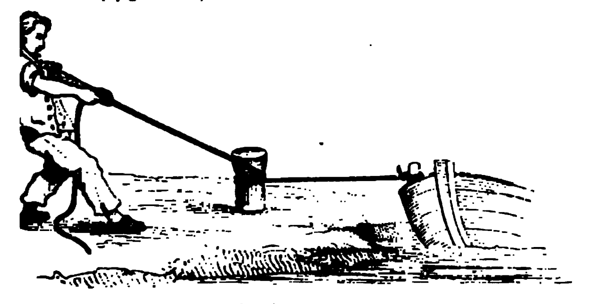


Fig. 199.

corde, pour que le bateau, éprouvant une grande difficulté à glisser sur le cylindre, ralentisse son mouvement de plus en it finisse par s'arrêter tout à fait. D'après ce que nous avons is le paragraphe qui précède, si la corde ne faisait qu'un utour du cylindre, et qu'il fallût, pour la faire glisser, lui uer, du côté du bateau, une force de traction 5 fois plus e que la résistance exercée par l'homme qui la retient, force de traction devrait être 25 fois plus grande que la ance, dans le cas où la corde ferait deux tours au lieu d'un elle devrait être 125 fois plus grande que la résistance, si de faisait trois tours ; et ainsi de suite. Mais si le bateau e une force de traction sur la corde, réciproquement la corde sur lui, en lui faisant éprouver une résistance égale à force de traction : on conçoit donc que, par le moyen qui vient indiqué, une faible résistance appliquée à la corde puisse r lieu à une résistance extrêmement grande appliquée au u.

rsque nous avons décrit le cabestan, nous avons dit (page 51), lieu d'attacher le câble sur la surface du cylindre, on lui fait deux ou trois fois le tour de cette surface*, puis qu'on applique *extrémité libre une force de traction* suffisante pour empê-

cher le câble de glisser. On conçoit maintenant comment une fa force, appliquée de cette manière, peut suffire pour empêch glissement, même lorsque la résistance que doit vaincre le câb est très considérable.

§ 143. **Perte de travail occasionnée par les chocs.** D'après ce que nous avons vu, lorsque, à un moment quelcon du mouvement d'une machine, le travail moteur qui se dével est plus grand que le travail résistant correspondant, l'excès de t vail moteur se transforme en mouvement. Le surcroît de mouve que la machine reçoit ainsi produit ensuite, lorsque le mouve se ralentit, une quantité de travail résistant précisément égale travail moteur qui l'avait occasionné. En sorte que, ainsi que n l'avons observé, l'excédant du travail moteur produit pendant certain temps, sur le travail résistant correspondant, s'emmaga dans la machine sous forme de mouvement, et se trouve plus t complétement utilisé, lorsque l'occasion s'en présente. Il est d indispensable de conserver le mouvement de la machine aut qu'on le peut, et d'empêcher qu'il ne se détruise, sans produi l'effet qu'il est capable de produire. C'est pour ce motif qu'on d toujours éviter avec soin qu'il y ait des chocs entre les diver pièces qui sont en mouvement. Pour faire bien comprendre ce q y a de nuisible dans un choc, nous allons entrer dans quelq détails.

Imaginons qu'une balle de plomb A, animée d'une certaine vites vienne choquer une autre balle de plomb B, de même masse et repos. D'après ce que nous avons vu (§ 117), ces deux balles mouvront, après le choc, avec une vitesse commune, égale à la moi tié de la vitesse qu'avait la balle A avant le choc. Voyons mainte nant quelles sont les quantités de travail moteur capables de pro duire le mouvement qui avait lieu avant le choc, et le mouvement qui succède au choc. La balle A, pour acquérir la vitesse qu'elle avait d'abord, aurait dû tomber d'une certaine hauteur; en multi pliant cette hauteur par le poids de la balle, on aura la mesure du travail moteur qui se serait transformé dans le mouvement qu'elle possédait immédiatement avant le choc. Les deux balles se mou vant ensemble, après le choc, avec une vitesse moitié de celle qu'a vait la balle A, auraient dû tomber, pour acquérir cette vitesse, d'une hauteur quatre fois plus petite que la précédente (§ 87); le travail moteur capable de produire leur mouvement n'est donc que la moitié de celui que nous venons de trouver: puisque, pour l'obtenir, il faut multiplier une masse deux fois plus grande par une hauteur quatre fois plus petite. Ainsi le mouvement que possédai

[redacted]

ux balles, après le choc, ne sera capable de produire que la du travail résistant qui aurait pu être produit par le mouvede la balle A avant le choc. La modification brusque que le apportée dans le mouvement des deux balles, a donc fait e la moitié de l'effet que ce mouvement pouvait produire.

us venons de prendre pour exemple le choc de deux corps enent dépourvus d'élasticité, et c'est pour cela que nous avons é que le choc occasionnait une perte de travail; le résultat été tout différent, si au lieu de deux balles de plomb, nous s considéré deux billes d'ivoire. Nous savons en effet que, si le A, animée d'une certaine vitesse, vient choquer la bille B ême masse et en repos, la bille A s'arrête complétement, et son mouvement passe dans la bille B (§ 118); le mouvement lieu après le choc est donc capable de produire exactement ême quantité de travail résistant que celui qui avait lieu avant oc: en sorte que, dans ce cas, le choc n'entraîne pas une e de travail.

est aisé de voir à quoi tient la différence de ces effets. Dans le des deux balles de plomb, il se produit une déformation qui iste après le choc; les forces moléculaires s'opposent à cette déation, qui donne lieu, en conséquence, au développement d'une aine quantité de travail résistant: c'est précisément ce travail stant, occasionné par le choc, qui détermine la perte de travail nous avons constatée. Dans le cas des deux billes d'ivoire, il se duit d'abord une déformation: mais, en vertu de leur élasticité, deux billes reviennent à leur forme primitive. L'éloignement molécules de leurs positions d'équilibre donne lieu à un travail istant; mais ces molécules, en reprenant les places qu'elles upaient d'abord à l'intérieur des deux billes, développent un vail moteur précisément égal au travail résistant dont on vient parler. La première partie du choc, celle pendant laquelle la formation des corps augmente, est accompagnée d'une perte de vail, de même que si ces corps étaient dépourvus d'élasticité; is la seconde partie, celle pendant laquelle la déformation dispat, est accompagnée d'un gain de travail qui compense exactent la perte précédente, et il en résulte que le choc tout entier a donné lieu à aucune perte de travail.

Ce que nous avons trouvé, dans les deux exemples simples que us venons de prendre, a lieu encore dans tous les autres cas. Le oc entre deux corps dépourvus d'élasticité détermine toujours une rte de travail, quelles que soient les formes et les masses de ces ux corps, et aussi quelles que soient les circonstances dans les-

quelles ce choc se produit. De même le choc entre deux corps faitement élastiques n'occasionne aucune perte de travail.

Les pièces qui se choquent dans les machines ne rentrent général, ni dans l'une, ni dans l'autre de ces deux classes extrê dont nous venons de parler; elles ne sont, ni dépourvues d'é cité, ni parfaitement élastiques. Mais, sous le rapport de la de travail, les choses se passent à très peu près comme si pièces étaient entièrement dépourvues d'élasticité. En effet, corps qui se sont choqués se séparent avant que la déform produite par le choc ait disparu, et c'est ce qui a lieu habitu ment, peu importe qu'elle disparaisse ensuite, ou qu'elle pers le travail moteur que produiront les molécules, en revenant à l positions d'équilibre, ne fera que déterminer des vibrations, qui transmettront de proche en proche dans les diverses pièces d machine, et finiront par se perdre complétement; ce travail mot ne pourra, en aucune manière, compenser la perte de travail occ sionnée par la déformation que les corps ont éprouvée. Les cho dans les machines, sont donc toujours accompagnés d'une perte travail; aussi doit-on les éviter avec le plus grand soin: et, si l ne peut empêcher certains chocs de se produire, doit-on fa en sorte que les corps qui se choquent présentent un grand de d'élasticité. Un autre puissant motif doit engager encore à empê la production des chocs, entre des pièces qui ne sont pas parfa ment élastiques: c'est que les vibrations que ces chocs déter nent causent des ébranlements qui détériorent promptement machines, et nécessitent de fréquentes réparations.

§ 144. **Conséquences générales de ce qui précède.** — résumant tout ce qui vient d'être dit sur les machines, consid à l'état de mouvement non uniforme, nous pouvons dire que:

1° Il n'est pas nécessaire que la puissance fasse toujours libre aux résistances; si, à certains moments, il y a un exc puissance, il en résulte une augmentation de mouvement ca de produire plus tard le même effet que cet excès de puis lui-même.

2° Si la puissance et les résistances ne se font pas constan équilibre, et qu'en conséquence la machine doive emmagasi certains moments, sous forme de mouvement, l'excès du moteur sur le travail résistant, on lui adapte un volant qui e tiné à empêcher que la vitesse ne varie d'une manière trop dérable, par l'accumulation du mouvement qu'occasionne ce de travail moteur.

3° Si, par l'accumulation successive du mouvement dé

[redacted]

ès du travail moteur, la vitesse de la machine peut devenir nde, l'emploi d'un régulateur à force centrifuge permet ır la puissance, pour en régler la grandeur, de manière à r la vitesse de la machine entre des limites convenables. s résistances passives qui se développent dans le mouve- ıne machine, absorbant inutilement une portion de la puis- est nécessaire de disposer la machine de manière à dimi- r influence autant qu'on le peut.

ıfin, les chocs entre deux corps qui ne sont pas parfaitement es, occasionnant toujours des pertes de travail, on doit les ar tous les moyens possibles ; et, si l'on ne peut pas y ar- n doit faire en sorte que les pièces qui se choquent soient es.

tenant que nous sommes arrivés à la connaissance des rincipes nécessaires pour l'étude des machines, nous allons ı l'application à un certain nombre d'exemples, choisis eux qui peuvent présenter le plus d'intérêt.

LICATION DES PRINCIPES PRÉCÉDENTS A L'ÉTUDE DE QUELQUES MACHINES.

5. **Descente, transport et érection de l'obélisque de** . — L'obélisque qu'on voit à Paris, au centre de la place de la de, a été amené, il y a peu d'années, de la haute Egypte, où it d'ornement à l'entrée principale du palais de Luxor. Nous oir par quels moyens on est parvenu à déplacer cette pierre le, et à l'installer dans la position qu'elle occupe maintenant : ı des meilleurs exemples qu'on puisse donner de l'emploi des es pour vaincre des résistances considérables.

élisque est de granite, et a la forme d'un tronc de pyramide rès allongée, surmonté sur sa petite base d'un pyramidion er. Le côté de la base inférieure a $2^m,42$; celui de la base ure a $1^m,54$: la distance de ces deux bases, comptée suivant st de $21^m,60$; enfin le pyramidion a une hauteur de $1^m,20$. ı de ces dimensions, on trouve que le volume de l'obélisque est ıètres cubes D'ailleurs le mètre cube de granite pèse 2750^k ; ı de l'obélisque est donc d'environ 230 000 kilogrammes. Si que était aussi large en haut qu'en bas, son centre de gra- ait sur son axe, et au milieu de sa longueur ; mais, en raison lus grande largeur de la partie inférieure, ce point se trouve *plus bas, à environ 9 mètres* de la base. Nous savons que

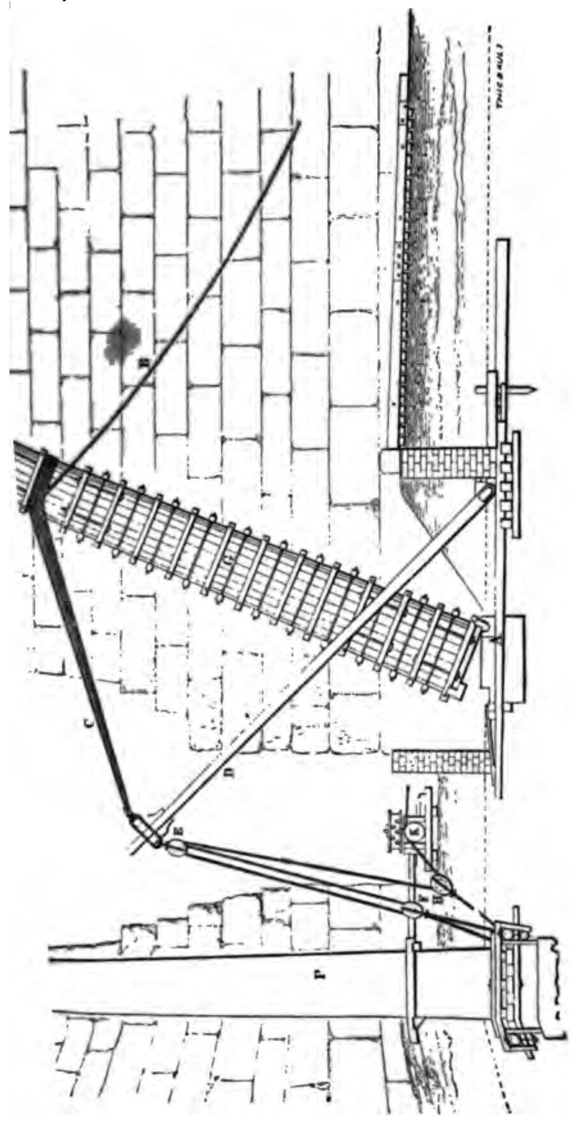
la considération du centre de gravité est indispensable, toutes les fois qu'il s'agit de faire mouvoir des corps pesants.

Pour amener l'obélisque de la haute Egypte à Paris, on avait construit un navire qui pût le transporter, depuis le point du Nil le plus rapproché du palais de Luxor, jusque dans l'intérieur de Paris. Ce navire, nommé *le Luxor*, devait donc descendre le Nil dans une longueur de 800 kilomètres, venir de l'embouchure de ce fleuve au Havre, à travers la Méditerranée et l'océan Atlantique, et enfin remonter la Seine, du Havre à Paris, dans une longueur de 400 kilomètres. Ce transport par eau a présenté de très grandes difficultés, tant sur mer que sur les deux fleuves, en raison de la forme spéciale qu'on avait dû donner au navire, pour qu'il pût marcher, dans des circonstances si diverses, avec un chargement considérable. Mais nous n'avons pas à nous en occuper ici : nous n'examinerons que les moyens dont on s'est servi pour descendre l'obélisque de sa base, en Egypte, et l'introduire dans l'intérieur du navire ; puis ceux qui ont été employés, à Paris, pour le transporter du navire sur la place de la Concorde, et pour l'ériger sur son piédestal, au milieu de cette place.

§ 146. On profita d'abord de la crue du Nil, pour amener le navire dans un lieu qu'on jugea convenable à l'embarquement, et où il devait se trouver à sec, lorsque les eaux du Nil se seraient retirées. Puis on construisit un chemin, allant en pente douce, depuis ce lieu jusqu'à l'obélisque. Pour donner à ce chemin une plus grande inclinaison, et faciliter ainsi le transport de l'obélisque au navire, on le fit aboutir, non pas à la base de l'obélisque, mais à 5 mètres au-dessus de cette base. Les opérations à effectuer pour embarquer l'obélisque consistaient donc à le renverser, pour le coucher sur le haut de cette espèce de plan incliné ; puis à le faire mouvoir le long de ce plan, jusqu'à ce qu'il fût introduit dans le navire, qui était placé sur le prolongement du chemin, et dont on avait enlevé la partie antérieure.

La première partie de ces opérations était celle qui présentait les plus grandes difficultés : il fallait renverser le monolithe, en le soutenant de manière à l'amener lentement, et sans secousses, dans une position à peu près horizontale. Si les machines employées pour cela n'avaient pas présenté une solidité suffisante, elles auraient cédé sous le poids de l'obélisque, et il se serait infailliblement brisé en tombant.

Après avoir recouvert ses quatre faces d'une enveloppe de bois destinée à garantir les inscriptions dont elles sont couvertes, on dégagea complétement l'arête de sa base qui se trouvait du côté de



plan incliné, puis on adapta, tout du long de cette arête, une for pièce de bois, entaillée de manière à l'emboîter complèteme Cette pièce de bois A, *fig*. 200, était arrondie extérieurement, et s trouvait placée dans une sorte de large cannelure, pratiquée da une autre pièce de bois de grande dimension, qui devait rester fix tandis que la première pièce devait suivre l'obélisque dans s mouvement. C'est autour de cette espèce de charnière que l'o devait faire tourner l'obélisque, pour l'abaisser sur le haut du pla incliné.

Pour produire ce mouvement, on attacha des câbles B à la tête de l'obélisque : puis, en les tirant fortement, à l'aide de cabestans, on amena la tête du côté du plan incliné. L'ensemble des forces nécessaires pour déterminer ce premier déplacement n'était qu'une petite fraction du poids total de l'obélisque, parce que leurs directions étaient beaucoup plus éloignées de l'axe de rotation A, que la verticale passant par le centre de gravité du monolithe. D'ailleurs ces forces n'avaient besoin d'agir que jusqu'à ce que le centre de gravité G vînt se placer verticalement au-dessus de l'axe A, comme le montre la *fig*. 201 : car, aussitôt que le corps aurait dépassé cette position, il devait continuer de lui-même à tourner autour de l'axe A, en vertu de l'action de la pesanteur. C'est alors que l'obélisque devait être retenu assez fortement, pour que son poids ne lui communiquât qu'un mouvement très lent et régulier.

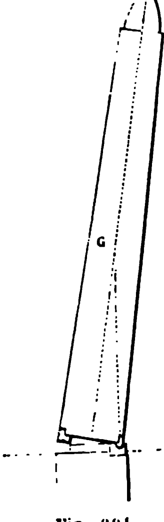


Fig. 201.

Il eût été extrêmement difficile de retenir l'obélisque, à l'aide de câbles disposés comme les câbles B dont nous venons de parler, mais placés de l'autre côté : de pareils câbles de retenue auraient dû exercer une résistance énorme vers la fin de l'opération. On voit en effet que, à mesure que le mouvement de rotation s'effectue, la verticale menée par le centre de gravité s'éloigne de plus en plus de l'axe A, tandis qu'au contraire, la direction de ces câbles de retenue se serait rapprochée de plus en plus de cet axe ; en sorte que, d'une part, le bras de levier sur lequel agit le poids de l'obélisque augmente constamment, et d'une autre part bras de levier de l'ensemble des résistances chargées de mo-

rer le mouvement, aurait été toujours en diminuant, jusqu'à venir très petit. Aussi a t-on adopté une autre disposition, qui a rmis de descendre l'obélisque sans avoir à exercer une si grande sistance.

La résistance nécessaire pour modérer la descente a été appliquée ar l'intermédiaire d'un cadre D, mobile autour de son côté inférieur. e cadre était formé de huit mâts disposés dans un même plan, quatre 'un côté de l'obélisque, et quatre de l'autre côté, ainsi que le fait oir la *fig*. 202; les extrémités inférieures étaient implantées dans

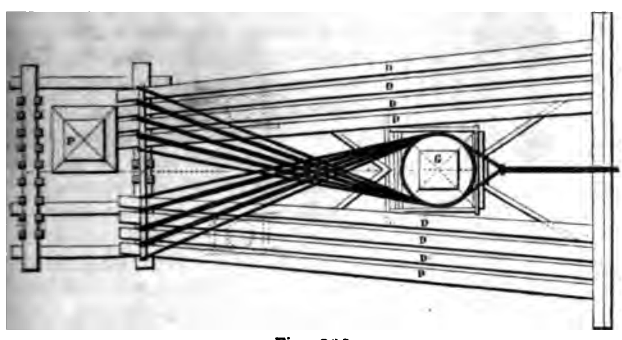


Fig. 202.

ne pièce solidement appuyée dans un angle ; et leurs extrémités upérieures, rapprochées les unes des autres, étaient réunies par leux moises, de manière à former un tout capable d'une grande résistance. Des câbles C étaient attachés d'une part à l'obélisque, et l'une autre part à l'extrémité supérieure du cadre D : c'est ensuite à ce cadre que la résistance a été appliquée, à l'aide des systèmes le moufles E, F. Si l'on examine les différentes positions qu'a dû prendre l'obélisque, pendant l'opération de la descente, et les positions qu'a prises en même temps le cadre D, tournant autour de son côté inferieur, on verra que les câbles C se sont toujours trouvés à une grande distance de l'axe de rotation A de l'obélisque, et que les câbles des moufles E, F, ont également toujours été convenablement éloignés de l'axe de rotation du cadre D. Ces câbles, agissant à l'extrémité de bras de levier qui ne devaient pas devenir trop petits, n'ont pas eu besoin de présenter une résistance aussi excessive que si les systèmes de moufles E, F, avaient été directement appliqués à la tête de l'obélisque.

Les systèmes de moufles E, F, étaient au nombre de huit ; chacun

d'eux agissait directement sur l'extrémité supérieure de l'un des huit mâts formant le cadre D, ainsi qu'on le voit sur la *fig.* 200. Une étude attentive de la disposition que devaient prendre les diverses parties de l'appareil, pendant toute l'opération, a fait voir que la résistance que chaque système de moufles aurait eu à exercer, sur son point d'attache au cadre D, ne dépasserait pas 13 000 kilogrammes. Ces moufles étaient d'ailleurs formées chacune de trois poulies réunies dans une même chape, en sorte que la corde qui passait sur les diverses poulies d'un même système formait six cordons parallèles, également tendus. Pour que la résistance exercée par l'ensemble de ces six cordons fût de 13 000 kilogrammes, il fallait donc que la tension de la corde fût d'un peu plus de 2000 kilogrammes. Ainsi les huit cordes qui se détachaient des huit systèmes de moufles, et qui étaient rendues horizontales à l'aide des poulies H, *fig.* 200, devaient servir seules à exercer toute la résistance nécessaire, pour laisser descendre lentement l'obélisque; et la tension de chacune d'elles ne devait guère dépasser 2000 kilogrammes, au moment où elles auraient à produire la plus grande résistance. Voici par quels moyens une pareille tension a été obtenue.

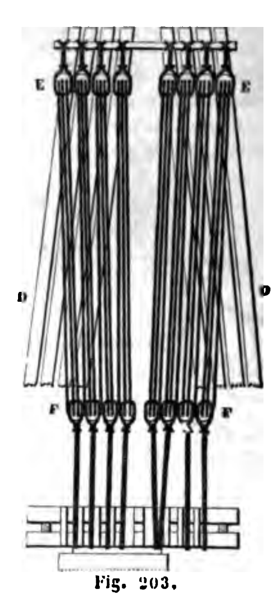


Fig. 203.

Chaque corde, après s'être détachée horizontalement d'une des poulies H, venait s'enrouler sur une espèce de treuil K, sur lequel elle faisait deux tours; puis elle le quittait pour venir s'enrouler autour d'un mât fixe L, *fig.* 204 ; ensuite elle changeait de direction, en passant sur une poulie de renvoi portée par la pièce M; enfin, après s'être encore enroulée autour d'un second mât fixe N, elle venait aboutir dans les mains d'un matelot. Pour que l'obélisque pût descendre, il fallait que les moufles supérieures s'éloignassent des moufles inférieures, et qu'en conséquence une longueur de corde, de plus en plus grande, vînt s'engager dans les systèmes de moufles. Les diverses portions de la corde, à mesure que le matelot la laissait filer dans ses mains, devaient donc glisser sur les surfaces des

fixes L, N, et faire tourner en même temps le treuil K, uvement de rotation pouvait se produire sans aucune ré- ous verrons tout à l'heure quel était l'objet de ce treuil : pouvons concevoir tout de suite comment la résistance r un homme sur la corde qu'il laissait filer entre ses mains ffire pour déterminer une tension de plus de 2000 kilo- sur la portion de cette corde qui s'engageait dans les mou- ue cette tension devait, en outre, vaincre le frottement le sur les deux mâts fixes L, N. Ainsi, par la disposition

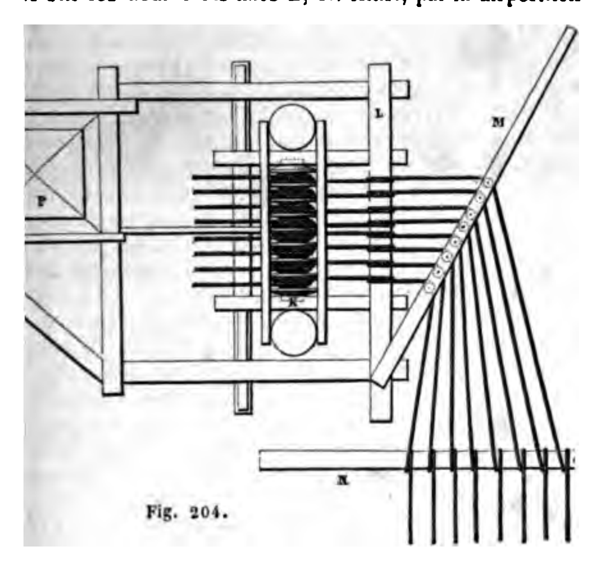


Fig. 204.

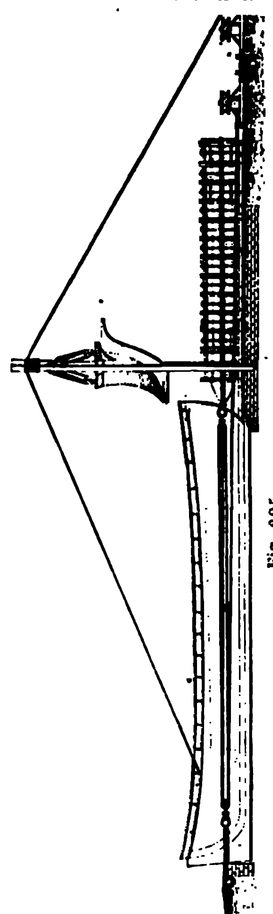
huit matelots, en retenant convenablement les cordes sur s ils agissaient, pouvaient maintenir l'obélisque en équi- ns une quelconque des positions qu'il devait prendre en nt ; et, en lâchant ces cordes, ils pouvaient le laisser des- vec toute la lenteur nécessaire au succès de l'opération, , l'expérience a prouvé que, lors même que la résistance à devait être la plus grande, ces matelots n'ont pas eu à dé- lus de la moitié de leur force.

euil K, sur lequel *chaque corde* faisait deux tours, et qui *librement, à mesure que les cordes* marchaient, ne contri- *à augmenter leur tension* ; il constituait cependant une des

parties les plus importantes de l'appareil, et a été d'une gra
utilité pour la réussite de l'opération. Il était destiné à empêd
qu'il n'y eût des tensions inégales dans les parties des huit co
qui étaient engagées dans les moufles. Si un des matelots a
exercé sur sa corde une résistance moins grande que les autres, c
corde aurait glissé plus facilement sur les mâts L. N; elle au
marché plus que les autres cordes, et sa tension dans les moufles
rait été plus faible. Les moufles correspondant à cette corde n'ex
çant pas sur le cadre D toute la résistance qu'elles devaient exer
les autres moufles auraient eu à résister plus fortement que si t
eût été régulier. Or, il aurait pu arriver de là que certaines mou
eussent à supporter une charge beaucoup plus forte que celle p
laquelle elles avaient été construites; si ces moufles s'étaient b
sées sous cet excès de charge, les autres se seraient trouvé
leur tour trop chargées, et tout l'appareil de retenue aurait
rompu. L'emploi du treuil K a eu pour objet de s'opposer à
grave accident, en maintenant de l'uniformité dans les tensions
huit cordes, et faisant ainsi que la résistance à exercer fût réguliè
ment répartie entre les huit systèmes de moufles. On voit, en ef
que, toutes les cordes s'enroulant à côté les unes des autres su
treuil K, ce treuil, en tournant, les laissait marcher toutes d'
même quantité; en sorte que leurs tensions dans les moufles, ég
au commencement de l'opération, devaient se conserver ég
pendant toute sa durée. Si un matelot venait à laisser filer
facilement sa corde, la tension de cette corde diminuait jusq
treuil: mais cette diminution ne pouvait être assez forte pour
la corde glissât sur le treuil, et en conséquence, de l'autre côt
treuil, sa tension était la même que celle de toutes les autres
treuil K avait donc pour objet de répartir uniformément, entr
diverses cordes, l'ensemble des tensions résultant des résista
inégales des huit matelots, de telle sorte que les tensions
48 cordons qui réunissaient les moufles inférieures aux mo
supérieures fussent exactement les mêmes. Par ce moyen on
employer, pour exercer une résistance de 13 000 kilogrammes
moufles dont les dimensions avaient été calculées sur une char
15 000 kilogrammes seulement; et avec de pareilles moufles, l'
ration n'aurait probablement pas réussi, si le treuil K n'avait
distribué régulièrement la résistance.

La *fig.* 204 fait voir que la surface du treuil K n'était pas
plement cylindrique: elle présentait comme huit gorges de po
dans chacune desquelles venait s'enrouler une des cordes. I
aisé de faire comprendre la nécessité de cette disposition. S

le fasse quelques tours sur un cylindre, et s'en de-
d'autre, comme on le voit dans la *fig* 66 (page 51),
que, lorsque le cylindre tournera, la corde s'enroule
déroule de l'autre. Il est clair que la corde ne se
ıjours en contact avec les mêmes points de la sur-
: les spires suivant lesquelles elle s'enroulera suc-
placeront à côté les unes des autres, la corde mar-
cylindre, et viendra bientôt le toucher à une de ses
t précisément ce qui serait arrivé pour les cordes
treuil K, si la surface de ce treuil eût été cylin-
ıvier à cet inconvénient, qui aurait fait manquer
pratiqué sur la surface du treuil huit rainures en
de poulies, dans chacune desquelles une des cordes
nent rester. Ces espèces de gorges de poulies pré-
té conique, que la corde devait envelopper. Pendant
la corde s'enroulait sur la partie la plus grosse du
et se détachait du fond de la gorge; elle tendait
sur ce rebord: mais elle glissait constamment, et
urs ramenée au fond de la gorge.
pas de pouvoir donner aux 48 cordons qui réunis-
es supérieures aux moufles inférieures des tensions
sez grandes pour soutenir l'obélisque dans sa chute:
que les moufles inférieures fussent attachées en des
nt une assez grande résistance, pour ne pas céder
e traction qu'ils devaient avoir à supporter. A cet
s de bois furent solidement fixées à la base d'un
e P, qui existait de l'autre côté de l'entrée du palais,
pièces de bois que les moufles inférieures furent
câbles d'une grande résistance.
nent de l'obélisque de sa base, par les moyens qui
décrits, eut lieu sans accident le 31 octobre 1831,
ıs l'espace de 25 minutes.
avons dit que le plan incliné qui devait servir au


Fig. 205.

sous le poids énorme qu'elle supporter, et l'obélisque co descendre, sans cesser de tou tour de la pièce A, jusqu'à c résistance opposée par son appui fût assez forte pour vain poids. Mais alors l'obélisque sur une large surface, à l'inté laquelle passait la verticale co dant à son centre de gravité; que le mouvement de bascu lequel on comptait, ne s'est p duit.

Pour amener l'obélisque couché sur le haut du plan on a dû soulever sa base, à l moufles et de cabestans, et le même temps par le sommet, le faire glisser dans le sens longueur. A partir de là, on eu qu'à le faire glisser sur longueur du plan incliné, en l à l'aide de cabestans qu'on d à mesure qu'il avançait. O soin, pour faciliter le glissem recouvrir le chemin de ma qu'on enlevait successivement partie que l'obélisque venait ter, pour les reporter en ava la partie du chemin qu'il allai dre. Ces madriers étaient c ment graissés, afin de dimi frottement.

Enfin, lorsque l'obélisque près du navire, dont on avai la partie antérieure, on le tir dans son intérieur en disposa pareil de traction, comme l'in *fig.* 205. Lorsque l'obélisque venablement installé, on refer verture qui avait été pratiqué navire, en rapprochant l

ılevée, et la fixant assez solidement pour qu'il n'y eût e de rupture pendant toute la traversée.

ıavire se mit en marche pour la France le 26 août 1832, ris, près la place de la Concorde, le 23 décembre 1833.

n disposa tout, pour le débarquement et l'érection de Les moyens qu'on employa pour cela sont exactement que ceux qui avaient servi, en Egypte, à faire les opéra-es.

:ha la partie antérieure du navire, pour rétablir l'ouver-quelle l'obélisque avait été introduit : on tira l'obélisque, ɜ cabestans, pour le faire sortir du *Luxor*, et le faire r le quai par un plan incliné. Pour l'embarquer, on l'avait r la tête en avant ; il dut marcher en sens contraire pour uement : sa base se présentait la première.

ı'il fut arrivé sur le quai, on le tira le long d'un plan incliné, t à cet effet, et qui aboutissait au niveau de la face supé-u piédestal sur lequel on devait le dresser. Il fut ainsi amené ne position telle, qu'il n'avait plus qu'à tourner autour de inférieure de sa base, pour venir se placer sur son piédestal. uvement de rotation s'effectua, comme pour la descente, d'une forte pièce de bois, qui embrassait dans toute sa lon-l'arete dont on vient de parler, et qui devait tourner, en temps que l'obélisque, autour de sa surface extérieure, lie à cet effet. Pour cela, il fallut d'abord soulever l'obélisque tête, jusqu'à ce que son centre de gravité eût dépassé le plan il mené par l'axe de rotation : à partir de là, il continua à r, en vertu de l'action de la pesanteur, sa base vint s'arrêter face supérieure du piédestal, et il prit ainsi la position qu'on lui laisser définitivement.

pareil qui servit à soulever l'obélisque, dans la première de l'opération, c'est-à-dire jusqu'à ce que son centre de gra-ît atteint le point le plus haut du cercle qu'il devait décrire, xactement le même que l'appareil de retenue employé pen-a descente, et décrit précédemment. Seulement les câbles, détachaient des systèmes de moufles, ne s'enroulaient plus de mâts fixes sur lesquels ils devaient glisser, et n'aboutis plus entre les mains d'autant d'hommes qui devaient les filer : ces câbles venaient s'enrouler sur les tours d'un même e de cabestans, à l'aide desquels on exerçait sur eux une le traction suffisante.

ıdant la seconde partie de l'opération, lorsque l'obélisque plus qu'à céder à l'action de la pesanteur pour achever sa

rotation, il fut retenu par des câbles attachés à sa tête, comme l'étaient les câbles de traction employés en Egypte pour commencer l'opération de la descente.

L'érection de l'obélisque à Paris eut lieu le 25 octobre 18… Tous les travaux de descente en Egypte, de transport de l'Egypte en France, et d'érection à Paris, furent effectués sous la direction de M. Lebas, ingénieur de la marine. L'idée de l'appareil de retenue pour la descente, est de M. Mimerel, autre ingénieur de la marine.

§ 149. **Moulins à farine**. — Pour extraire des grains la farine qu'ils contiennent, on les broie entre deux pierres : l'enveloppe de chaque grain se trouve brisée ; ses débris, qu'on désigne sous le nom de *son*, se mêlent à la farine ; et il ne reste plus qu'à les séparer à l'aide d'un tamis, qui laisse passer la farine à travers son

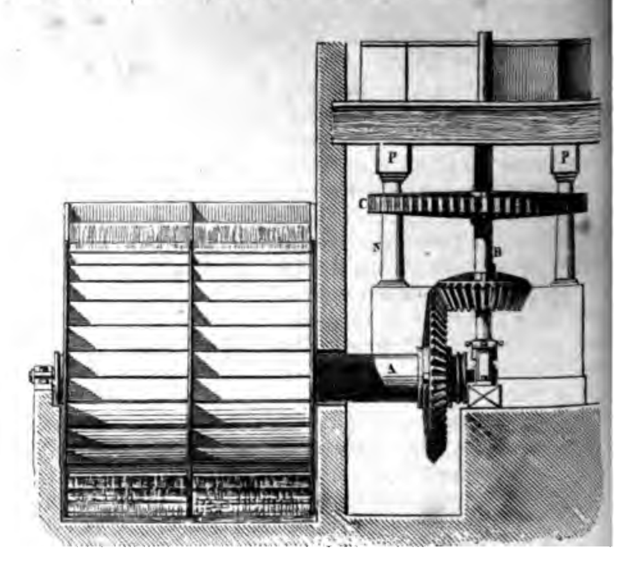


Fig. 206.

tissu, sans laisser passer le son. C'est dans les *moulins à farine* que s'effectuent ces opérations : nous allons voir quelle est la disposition de la partie de ces moulins dans laquelle les grains sont broyés.

Les pierres, ou *meules*, qui servent à effectuer cette opération

ndant longtemps mises en mouvement par des hommes naux. Maintenant elles sont toujours mues, soit par l'eau, vent, soit par la vapeur. Les *fig.* 206 et 207 représensposition d'un moulin à eau. Une roue hydraulique est ouvement par une chute d'eau. Nous ne nous arrêterons ette roue, sur laquelle nous reviendrons plus loin, pour re compte de la manière dont l'eau la fait tourner. L'ar-a roue hydraulique, *fig.* 206, pénètre à l'intérieur du bâi renferme le moulin, et communique son mouvement n à un arbre vertical B, à l'aide de roues d'angle. Sur est fixée une grande roue dentée horizontale C; et cette communiquer son mouvement à deux meules, par l'in-re de deux autres roues dentées plus petites D, E, *fig.* 207. de ces deux roues peut glisser le long de l'arbre vertical

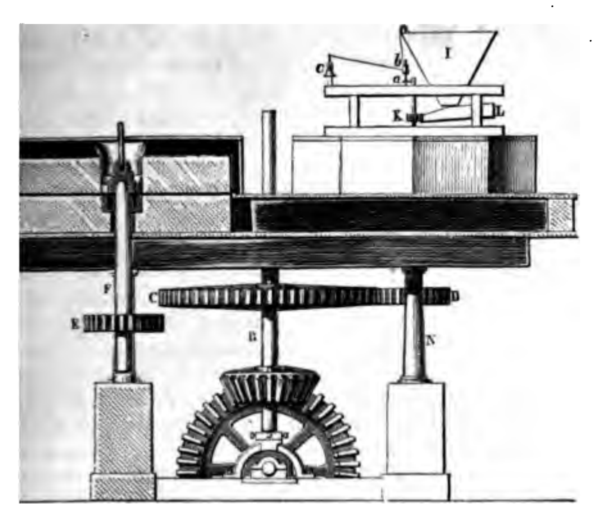


Fig. 207.

uel elle est montée, et lorsqu'on l'a amenée ainsi dans la i où elle doit rester, on la fixe sur son arbre à l'aide de coins ntroduit entre elle et l'arbre, dans des rainures pratiquées à t. De cette manière, les roues D, E, peuvent être placées à ur de la grande roue C, afin d'engrener avec elle; ou bien

on peut les abaisser au-dessous de cette roue, pour supprimer la communication de mouvement. La *fig.* 207 montre la roue D placée de manière à tourner sous l'action de la roue C; tandis que la roue E, n'engrenant pas avec cette roue C, n'en reçoit aucun mouvement. On peut donc, à volonté, faire marcher les deux meules à la fois, ou bien n'en faire marcher qu'une seule, suivant les besoins. La *fig.* 207 montre les deux paires de meules qui correspondent aux deux roues D, E: mais elle ne les montre pas de la même manière. La portion de gauche de cette figure est une coupe destinée à faire voir la disposition relative des deux meules, entre lesquelles le grain est broyé. La portion de droite, au contraire, est une élévation qui montre l'enveloppe octogone de bois, à l'intérieur de laquelle se trouvent les meules, ainsi que l'appareil placé au-dessus, et destiné à leur fournir le grain.

L'arbre F, sur lequel est montée la roue E, traverse une première meule qui reste fixe, et qu'on nomme *meule dormante*; il s'élève un peu au-dessus, et supporte sur sa tête la seconde meule, ou *meule courante*. Cette seconde meule n'a pas d'autre point d'appui: son centre de gravité doit être tellement placé, que sa face inférieure se maintienne horizontale, afin qu'il existe tout autour une même distance entre les deux meules. Pour satisfaire à cette condition, c'est-à-dire pour *équilibrer* la meule courante, on ajoute du plâtre en divers points de sa face supérieure, jusqu'à ce qu'elle ne penche pas plus d'un côté que de l'autre. Pour que les deux meules aient entre elles une distance convenable, on élève ou l'on abaisse la meule courante; on y parvient en faisant monter ou descendre, à l'aide d'une vis, la crapaudine sur laquelle repose le pivot inférieur de l'arbre F.

Le grain qui doit être soumis à l'action des meules est placé dans une trémie I: à la partie inférieure de cette trémie, existe une ouverture dont la grandeur peut être réglée à volonté. Immédiatement au-dessous est suspendue une petite auge inclinée L, son mode de suspension lui permet d'osciller facilement, sous l'action des oreilles K, fixées à un prolongement de l'axe qui supporte la meule courante. Lorsque la meule tourne, ces oreilles K viennent successivement choquer latéralement l'auge L, et déterminent l'écoulement d'une petite quantité du grain contenu dans la trémie. Le grain qui tombe ainsi, peu à peu, pénètre dans une ouverture centrale de la meule courante, ouverture qui n'est interceptée qu'en partie par la pièce de fer qui sert à suspendre la meule sur la *tête de l'arbre* F: il arrive, de cette manière, au centre de la *face supérieure* de la meule dormante, et s'engage entre les deux

[redacted]

es. L'ouverture centrale de la meule dormante, dans laquelle ie l'arbre F, est garnie de cuir et de drap, afin d'éviter que le ı ne la traverse pour tomber au-dessous de cette meule. La e courante tend à entraîner chaque grain dans son mouvement otation : et comme il n'existe qu'une faible distance entre les . meules, le grain est broyé en même temps qu'il est entraîné. que parcelle qui est mise en mouvement décrirait une circonnce de cercle, si elle était attachée à la meule courante ; mais, ieu d'y être attachée, elle en reçoit seulement des impulsions cessives, et, en vertu de chacune de ces impulsions, elle se lace suivant la tangente au cercle que décrit la partie corresdante de la meule. Il en résulte que les poussières qui provient de l'écrasement du grain s'éloignent du centre de la meule mante, en même temps que la meule courante les fait tourner our de ce centre. Le mélange de farine et de son, ainsi transté vers la circonférence des deux meules, finit par les abandon-, et vient s'accumuler dans un espace annulaire qui existe tout our de la meule courante. Arrivé dans cet espace annulaire, il encore entrainé par la meule, et vient tomber dans un trou tiqué en un point de son contour. De là le mélange de farine et son est conduit dans des appareils destinés à opérer la sépara-a de la farine et du son. Ces appareils, ainsi que ceux qui sert à nettoyer le grain avant de le moudre, sont également mis mouvement par la roue hydraulique : à cet effet, l'arbre B se olonge à travers le plancher qui est au niveau des meules, et rte, vers sa partie supérieure, les roues et tambours nécessaires cette transmission de mouvement.

Une sonnette c est disposée de manière à avertir le meunier, rsque la trémie ne contient presque plus de grain. La sonnette t reliée par une ficelle à un taquet de bois, *b*, qui est traversé par ie tige verticale de fer. Ce taquet peut monter ou descendre le ng de cette tige, et peut également tourner autour d'elle, sans la oindre difficulté : il est soutenu par une autre ficelle qui pénètre ns la trémie en passant sur une petite poulie, et qui se termine r un morceau de bois assez léger. Ce morceau de bois est enfoncé ns le grain de la trémie, et s'y maintient tant que le grain est en antité suffisante, de manière à soutenir le taquet *b* à une hauteur nvenable ; mais lorsqu'il n'y a presque plus de grain dans la mie, le taquet *b* retombe, en faisant remonter le morceau de is, qui n'est plus retenu par le grain. Dès lors, un doigt *a*, qui : fixé au *prolongement de l'arbre* de la meule courante, et qui *rne en même temps que cette meule*, vient choquer le taquet b

à chaque tour, et fait ainsi sonner la sonnette. Le bruit qui en résulte ne cesse de se faire entendre qu'après que le meunier ayant rempli la trémie, a enfoncé dans le grain le morceau de bois qui soutient le taquet *b* au-dessus du doigt *a*.

Des colonnes N, au nombre de quatre, reposent sur deux blocs de pierre, et supportent deux fortes pièces de bois P, sur lesquelles sont installées les deux meules dormantes. Les mêmes blocs de pierre portent les crapaudines sur lesquelles s'appuient les arbres des meules courantes.

§ 150. Les meules sont quelquefois formées d'un seul morceau de pierre; mais alors elles sont généralement défectueuses. Les meilleures meules sont construites par la réunion de plusieurs pierres bien choisies, liées entre elles par du plâtre, et fortement consolidées par des cercles de fer. Le diamètre d'une meule, dans les anciens moulins, varie de $1^m,80$ à $2^m,30$; mais dans les nouveaux moulins, dits à l'anglaise, les meules n'ont que $1^m,30$ de diamètre. Les meules qui sont formées de pierres choisies, ne présentant pas de cavités, ont besoin d'être taillées d'une manière particulière pour que leur surface ne soit pas tout à fait unie. On y pratique habituellement des espèces de sillons, dirigés du centre à la circonférence, et disposés comme l'indique la *fig.* 208. Les sillons ne sont pas tracés suivant des rayons, mais présentent au contraire une obliquité très prononcée sur leur direction, et cela dans le même sens sur les faces de chacune des deux meules. On comprend aisément, d'après cela, que, lorsque ces deux faces sont appliquées l'une sur *l'autre*, ce qui n'a pu se faire qu'en retournant la meule courante, *les sillons* de cette meule font un angle avec ceux de la meule

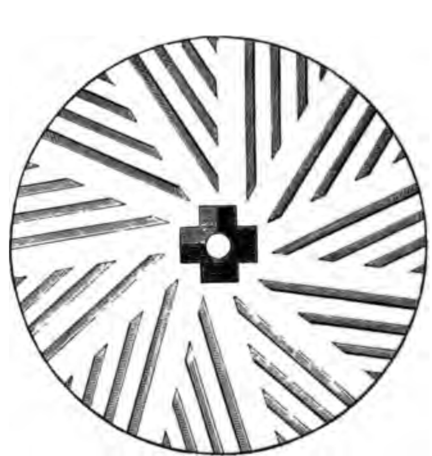


Fig. 208.

nte, au-dessus desquels ils sont placés ; et, pendant que la courante tourne, les bords de ces sillons agissent comme ux lames d'une paire de ciseaux on ferme. Les sillons n'ont que le profondeur, et cette profon- va en diminuant progressive- d'un bord à l'autre bord, où elle duit à rien. La *fig*. 209 est une e faite dans les deux meules, pla- l'une au-dessus de l'autre, afin de trer la forme de la section transversale des sillons, et la manière ils se présentent sur l'une et l'autre meule. La flèche indique ns du mouvement de la meule supérieure.

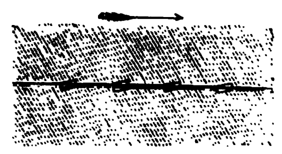


Fig. 209.

ne paire de meules peut moudre de 15 à 16 hectolitres de blé 24 heures. On a reconnu que, pour obtenir une bonne mouture, oit faire faire à la meule courante environ 70 tours par minute. en déduira sans peine le nombre de tours que devra faire l'arbre a roue hydraulique dans une minute, à l'aide des nombres de ts des roues dentées qui établissent la communication de mouve- t depuis cet arbre jusqu'à la meule. On disposera en consé- nce la roue hydraulique de telle manière que, sous l'action de hute d'eau, elle prenne la vitesse qu'on aura ainsi trouvée.

151. **Scieries mécaniques.** — Le mouvement régulier que doit ndre une scie, pour scier le bois, peut être produit par une ma- ie mue, comme un moulin, soit par un cours d'eau, soit par le t, soit par la vapeur. On obtient même par là des résultats bien érables à ceux qu'on pourrait obtenir avec des scies mues à la n. Les scies mécaniques sont très fréquemment employées dans pays de montagnes, où de nombreuses chutes d'eau permettent débiter les bois presque sans frais. En Hollande, il existe de ps immémorial des scieries qui marchent par l'action du vent. omme exemple de ce genre de machines, nous prendrons une scies de la scierie mécanique de Saint-Maur, près Paris. Cette rie contient seize scies, qui reçoivent toutes leur mouvement e chute d'eau agissant sur une turbine. La plupart des scies ent à fabriquer des feuilles d'acajou pour le placage : quelques s sont employées à faire des planches. C'est une des premières nous allons décrire.

a turbine, qui reçoit l'action de l'eau, fait tourner un arbre hori- al, ou arbre de couche, qui s'étend dans toute la longueur de lier. Sur cet *arbre sont adaptés*, de distance en distance, des *ours, A, fig. 210, qui reçoivent* sur leur contour des courroies

sans fin, destinées à transmettre le mouvement de l'arbre aux canismes des scies. Chaque courroie vient embrasser un second t bour B, de plus petit diamètre que le tambour A, et lui communique un mouvement de rotation très rapide Elle a besoin pour cela d'avoir une tension suffisante, sans quoi elle glisserait sur le tambour B : cette tension est déterminée par la pièce de bois CD, tournant librement autour d'un boulon D, et s'appuyant sur la courroie par le galet C, qui tourne en même temps

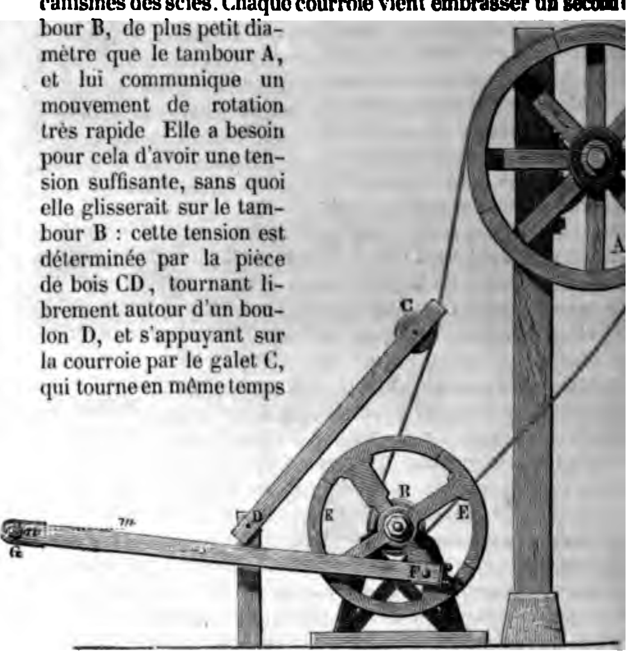


Fig. 210.

que la courroie marche. Pour arrêter le mécanisme qui com nique avec le tambour B, il suffit de relever la pièce de bois CI courroie n'est plus tendue, et elle marche sans entraîner le tamb sur la surface duquel elle glisse.

Un volant E est adapté à l'extrémité de l'axe du tambour B des rayons du volant porte un boulon F, qui traverse l'extré d'une bielle FG : cette bielle, articulée en G au châssis de la est mise en mouvement par le volant, comme par une manivell son extrémité G prend un mouvement de va-et-vient, suivant la horizontale *mn*.

Le châssis de la scie, qui est placé horizontalement, a, com l'ordinaire, la forme d'un rectangle traversé en son milieu, da *sens de sa longueur*, par une tringle de bois HH, fig. 211 ; w

[redacted]

ctangle, celui qui est en arrière de la tringle HH, est
a lame de scie II, dont les deux faces sont verticales, et
nts sont tournées vers le bas: l'autre côté du rectangle

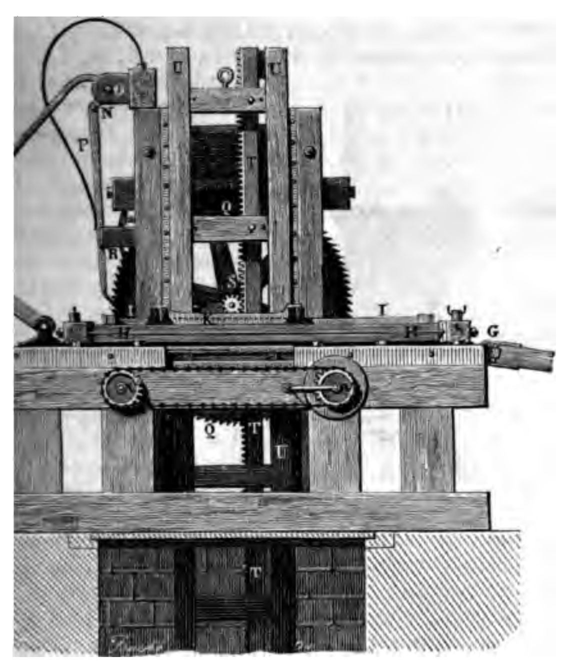


Fig. 211.

par une tige de fer, placée en avant de la tringle HH, et
xtrémités sont garnies de filets de vis et d'écrous, desti-
ner une forte tension à la lame de scie, dans le sens de sa
Contre la face antérieure de la lame de scie, se trouve une
r K, taillée en biseau le long de son bord inférieur, et
maintenir la lame de scie toujours exactement dans la
tion, pendant qu'elle est animée du mouvement rapide de
t, qui lui est transmis par la bielle articulée en G. Le mou-
châssis est d'ailleurs dirigé d'une manière précise par des
de fer *qui glissent dans des coulisses* fixées au support
me.

D'après la manière dont la scie est disposée, elle ne]
ni s'abaisser ; dans son mouvement de va-et-vient, elle
exactement à la même hauteur. Il est donc nécessaii
d'acajou qui doit être scié se déplace afin de se pré
même aux dents de la scie ; voici la disposition qui
pour atteindre ce but. Le morceau d'acajou X, *fig.* 21
la colle forte sur un (
châssis est ensuite
de boulons et d'écrou
UU, *fig.* 211, qui]
voir verticalement, (
rigé dans ce mouve
languettes de fer glis
coulisses, comme le
zontal de la scie. Un(
ticulée d'un bout à l
châssis de la scie, e
l'autre bout par la t
qui pour cela se reco
talement. Les deux
M et N forment con
bras d un levier cou
tourner autour du
sorte que le mouvem

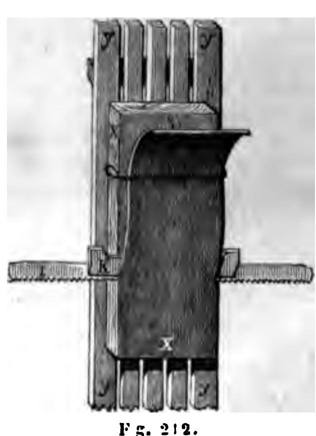


Fig. 212.

vient du cadre de la scie détermine un mouvement d'
bras de levier N autour du point O, par l'intermédiaiı
L, et du long bras de levier M. A l'extrémité du bras
est articulée une tige P, qui se termine par une petite l
pied-de-biche ; ce pied-de-biche vient s'engager entre l(
roue Q, et y est maintenu par un grand ressort courb
toujours sur le contour de la roue. Un autre pied-de-bi(
en un point fixe, s'engage de même entre les dents de
y est également maintenu par un petit ressort à bou(
des oscillations continuelles du bras de levier N, le pi(
s'élève et s'abaisse successivement : lorsqu'il s'élève,
glisser sur les saillies des dents de la roue Q ; mais lorsc
il saisit une de ces dents, et la force à s'abaisser, ce qu
la roue. Le pied-de-biche R n'a d'autre objet à rempl
pêcher la roue Q de se mouvoir en sens contraire, p(
pied-de-biche P remonte. L'axe de la roue Q porte un
engrène avec une crémaillère T faisant corps avec i
On voit donc que, pendant que la scie est animée d'v

[redacted]

èce d'acajou sur laquelle elle doit agir, et qui est chée au cadre UU, monte d'un mouvement lent scie peut donc pénétrer dans le morceau d'aca-nsi en deux parties.

on a besoin d'obtenir des feuilles d'acajou extrê- sorte que ces feuilles sont flexibles, et lorsque la ne longueur déjà un peu grande, elles ne peuvent elles-mêmes. La *fig*. 212 montre de quelle ma- ces feuilles d'acajou, pendant que l'opération scie en détache une longueur de plus en plus de fer biseautée K, qui est appliquée contre la a lame de scie, écarte la feuille d'acajou du mor- lus haut, cette feuille est embrassée par une sorte fer, qui fait ressort, et dont les extrémités recour- ées l'une de l'autre, pour venir s'appuyer sur les morceau d'acajou.

de l'appareil qui supporte le cadre UU peut se e à l'avant. Ce mouvement se produit à l'aide de es, dont les têtes V, V, apparentes sur la *fig*. 211, ux petites roues dentées du même diamètre. Une brasse ces deux petites roues, en sorte que l'une pas tourner sans que l'autre tourne exactement ité et dans le même sens. Une manivelle, fixée à à les faire mouvoir. A l'aide de cette manivelle, deux vis, qui sont disposées de manière à ne pas ens de leur longueur; les écrous qui sont enga- sont donc obligés de marcher en avant ou en ar- on fait tourner la manivelle dans un sens ou dans ntnent dans ce mouvement le cadre UU auquel ils çoit qu'à l'aide d'un pareil mécanisme, on puisse, ncer un nouveau trait de scie, faire avancer ce eau d'acajou qui lui est attaché, d'une quantité petite qu'on voudra, et que, par conséquent, on feuilles d'une épaisseur très petite et toujours la

bour A, *fig*. 210, fait environ 55 tours par minute; t 5 fois plus grand que celui du tambour B, celui- tours par minute : c'est aussi le nombre de coups dans le même temps. A chaque coup de scie, le monte d'environ ½ millimètre. Avec une scie de *obtenir 36 mètres carrés* de feuilles dans un jour. *on fait avancer le* morceau d'acajou à l'aide des

vis V, V, chaque fois qu'on veut faire un nouveau trait de
de $1^{mm},2$: et comme le déchet en sciure est de 50 pou
s'ensuit que chaque feuille d'acajou n'a guère plus de $\frac{1}{2}$ m
d'épaisseur.

Les scies mécaniques employées pour faire des plan
disposées verticalement, et marchent moins vite que les sc
cage : elles ne donnent que 110 à 140 coups par minute.
tité dont on fait marcher le morceau de bois, à chaque cou
varie de 2 à 5 millimètres, suivant la dureté du bois.

On emploie aussi fréquemment des scies circulaires,
tionnent en tournant toujours dans le même sens, tandi
scies rectilignes doivent nécessairement avoir un mouv
va-et-vient. Les scies circulaires servent à scier le bois o
taux. Pour égaliser les bouts des rails des chemins de fer,
à ces rails une longueur uniforme, on coupe les bouts,
avoir fait rougir : on se sert pour cela de scies circulair
bien battue, qui ont un mètre de diamètre et $2^{mm},75$ d'é
et qui font 850 tours par minute. Afin que la scie ne s'éch
trop, on fait plonger sa partie inférieure dans un vase qui
de l'eau.

§ 153. **Marteaux de forges.** — Les gros marteaux
vent, dans les forges, à travailler les fortes pièces de fer.
en mouvement par des roues hydrauliques ou des machi
peur : nous donnerons pour exemple de ces marteaux cel
représenté par la *fig.* 213, et qui fonctionne dans les a
M. Cavé, à Paris.

La tête A du marteau est de fonte, et pèse plus de 1
grammes. Elle est percée d'une large ouverture, dans la
nètre l'extrémité du manche B, qui y est fixé à l'aide d'u
manche porte, vers le milieu de sa longueur, deux tourill
l'un d'un côté, l'autre de l'autre : ces tourillons sont sup
deux coussinets adaptés, en C, à deux fortes pièces de b
cales entre lesquelles passe le manche du marteau. De
D, D, fixées à un arbre horizontal, viennent successivem
dant la rotation de l'arbre, appuyer sur la queue du man
marteau est soulevé, retombe, est soulevé de nouveau, e
suite. L'arbre qui porte les cames D, D, reçoit son mouv
rotation d'une machine à vapeur qui agit sur la manivelle
volants F, exactement pareils, sont fixés sur cet arbre, l
côté des cames D, D, l'autre de l'autre côté. La figure ne
voir qu'un seul de ces deux volants : celui qui est en ava
celui qui est en arrière.

[redacted]

ng levier GH, mobile horizontalement autour du petit axe

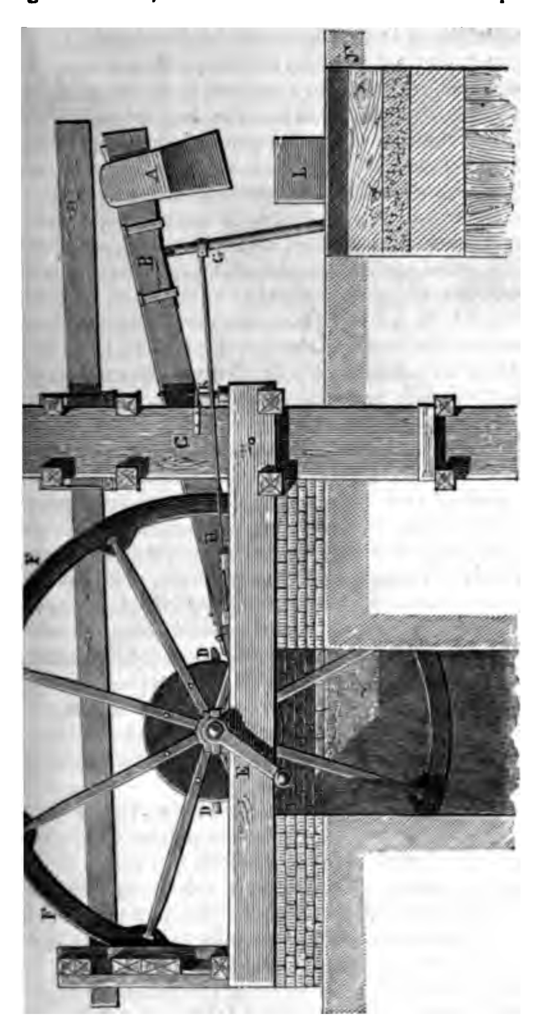


Fig. 213. Échelle de 12 millimètres pour mètre.)

K, est fixé en G à une forte barre de fer, à l'aide de laquelle

on arrête le travail du marteau. A cet effet, pendant q
teau fonctionne, on tire en avant l'extrémité H du levie
de fer, attachée à l'autre extrémité G de ce levier, se
arrière, et vient se placer sous le manche du marteau,
à l'empêcher de retomber sur l'enclume L. Si les cames
tinuent à agir sur la queue du manche, le marteau se s
un peu : mais il ne tombe ensuite que d'une petite quanti
ainsi suspendu au-dessus de l'enclume, à une distance
pour qu'on puisse facilement manœuvrer la pièce de fe
être forgée. Lorsqu'on veut mettre le marteau en activi
marcher la machine à vapeur : l'arbre des cames tourn
fois qu'une came vient à rencontrer la queue du marte
soulève un peu, et le laisse retomber aussitôt sur la ba
qui le soutient. On saisit alors le moment où le marteau e
pour pousser rapidement en arrière l'extrémité H du le
trémité G se trouve ainsi reportée en avant, en entraîna
de fer qui soutenait le marteau, et celui-ci, ne rencon
d'obstacle, tombe sur l'enclume.

§ 134. Il est aisé de voir pourquoi l'arbre des cames
de volants. Cet arbre est soumis à l'action incessante de
à vapeur, qui tend constamment à accélérer son mouvem
qu'il n'a de résistance à vaincre qu'au moment où une
se trouve en contact avec la queue du marteau. Le mou
rotation de l'arbre serait donc très irrégulier, si les vola
taient pas, en raison de la grande irrégularité des rési
lui sont appliquées. Ce mouvement s'accélérerait sans ce
le moment où une des cames quitterait la queue du ma
qu'à celui où l'autre came viendrait la saisir ; et aussitôt
d'une came commencerait, la vitesse de l'arbre diminuera
ment d'une quantité considérable. Nous avons vu (§ 132
des volants est précisément d'empêcher cette grande var
la vitesse d'une machine.

[redacted]

ment en mouvement toute la masse du marteau et de son manche. L'arbre des cames est donc soumis, au moment de ce choc, à l'action d'une force résistante énorme. S'il était muni d'un seul volant, qui serait nécessairement placé à côté des cames, les chocs successifs qu'il éprouverait tendraient à le tordre; tandis que cet effet ne peut se produire, par suite de l'emploi de deux volants égaux, disposés symétriquement de part et d'autre des cames.

§ 153. On voit, sur la figure, une longue pièce de bois horizontale, qui passe entre les deux volants, et se prolonge jusqu'au-dessus de la tête du marteau. Cette pièce est destinée à augmenter le nombre des coups de marteau qu'on peut donner dans un même temps, sans pour cela diminuer l'intensité de chacun de ces coups. Pour s'en rendre compte, il faut observer que la came, en agissant sur le marteau, lui communique une certaine vitesse dirigée de bas en haut: lorsque la came l'abandonne, il continue à monter, en vertu de sa vitesse acquise, et s'il ne rencontrait pas d'obstacle, il monterait jusqu'à ce que l'action de la pesanteur eût complétement détruit sa vitesse; alors il retomberait, et viendrait choquer la pièce de fer placée sur l'enclume avec la vitesse due à la hauteur dont il serait tombé (§ 88). Pour que le choc se produisît avec une vitesse déterminée, il faudrait donc, si les choses se passaient ainsi, que l'intervalle de temps compris entre deux coups de marteau fût assez grand pour que le marteau pût s'élever à la hauteur correspondant à cette vitesse, et retomber ensuite de toute cette hauteur; en sorte que, plus la vitesse du marteau, au moment du choc, devrait être grande, moins ce marteau pourrait donner de coups dans un même temps. Si, au contraire, le marteau rencontre, en montant, un obstacle élastique qui l'empêche de s'élever davantage, et qui le renvoie avec une vitesse, dirigée de haut en bas, égale à celle qu'il avait au moment où il l'a rencontré, il retombera plus tôt, et les coups seront plus précipités, sans perdre de leur intensité. C'est dans ce but qu'on emploie la pièce de bois qui nous occupe. Elle présente une assez grande élasticité, pour que les choses se passent à peu près comme nous venons de le dire. Le choc de la tête du marteau contre cette pièce de bois diminue bien un peu l'intensité des coups de marteau, mais cette diminution est accompagnée d'une augmentation considérable dans la rapidité du travail.

Il ne faut pas croire cependant que le moyen qui vient d'être indiqué, pour augmenter le nombre de coups que le marteau peut donner *pendant un certain temps, tout* en affaiblissant un peu la *grandeur de chacun d'eux, accroisse* la puissance de la machine,

c'est-à-dire lui fasse produire une plus grande quantité de travail utile, avec une même dépense de travail moteur. Si le marteau donne plus de coups en une heure, il faudra que la machine à vapeur agisse en conséquence, et développe une plus grande quantité de travail moteur : en général, la quantité de travail développée par cette machine sera proportionnelle au nombre de coups que le marteau donnera, quel que soit le temps que durera l'opération. L'emploi de la pièce de bois qui limite la course verticale du marteau présente plutôt un inconvénient qu'un avantage, sous ce rapport : puisque le choc du marteau contre cette pièce entraine toujours une diminution dans la grandeur du coup qu'il donne en retombant, et que, par conséquent, avec une même quantité de travail moteur, on produit moins de travail utile.

§ 156. Nous avons dit précédemment (§ 143) qu'il fallait éviter, autant que possible, qu'il se produisit des chocs entre les diverses pièces d'une machine en mouvement. La machine dont nous nous occupons est loin de satisfaire à cette condition : mais les chocs qui ont lieu, pendant qu'elle fonctionne, ne jouent pas le même rôle, sous le rapport de la perte de travail qu'ils peuvent occasionner. D'abord le choc du marteau contre la pièce de fer qu'il s'agit de forger n'entraine pas de perte de travail : c'est dans ce choc même que consiste le travail que la machine doit effectuer, et l'on ne peut pas chercher à l'éviter. La perte de travail produite par un choc entre des corps non élastiques est due, en grande partie, à la déformation permanente que ces corps éprouvent par l'effet du choc : et c'est précisément cette déformation qu'on veut obtenir ici, en employant le marteau. Seulement, comme l'enclume ne peut pas être rendue rigoureusement immobile, on a soin de la faire reposer sur un ensemble de pièces de bois, placées, les unes verticalement, les autres horizontalement : en sorte que l'élasticité de ce support lui permet de céder un peu, au moment du choc du marteau, et la ramène ensuite dans la position qu'elle occupait avant le choc.

En second lieu, le choc de la tête du marteau contre la pièce de bois qui l'arrête quand il s'élève, ne donne lieu qu'à une faible perte de travail, en raison de la flexibilité et de l'élasticité que présente cette pièce, d'après la manière dont elle est disposée.

Il ne reste plus que le choc des cames contre la queue du marteau, qui est réellement nuisible par les ébranlements et la perte de travail qu'il détermine.

§ 157. **Bocards.** — On donne le nom de *bocard* à un appareil *composé* de plusieurs pilons, qu'on soulève, pour les laisser retom

[redacted]

ensuite, afin de pulvériser les matières soumises à leur action. bocards sont fréquemment employés dans le voisinage des s métalliques, pour réduire en poudre les minerais qui conent des parties non métalliques ou *gangues*, ce qui permet ite de les débarrasser facilement de ces gangues. Les *fig.* 214 15 représentent un bocard qui sert à pulvériser le minerai de b de la mine de Huelgoath, en Bretagne.

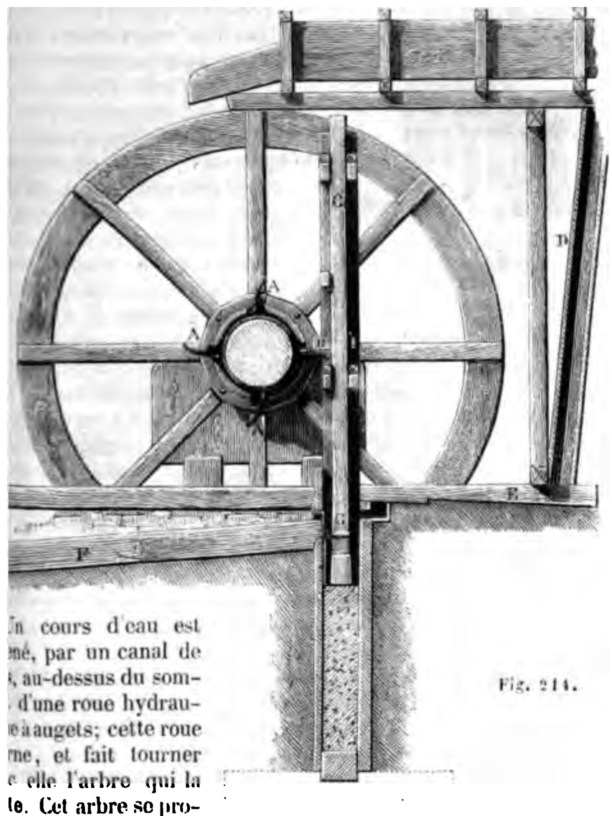


Fig. 214.

n cours d'eau est né, par un canal de , au-dessus du som- d'une roue hydrau- e à augets; cette roue rne, et fait tourner e elle l'arbre qui la te. Cet arbre se pro- ge d'un côté de la roue, et passe devant les pilons, qui sont *és à la suite les uns des autres*, parallèlement à l'axe de l'arbre.

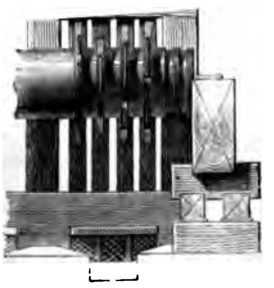


Fig. 215.

dans
guide:
Si
sur l'a
cer en
différe
raient
raient
même
l'arbre
inégale.
servé u
sensible

que les pilons auraient été soulevés par le
brusquement nulle, au moment où les ca
pilons pour les laisser retomber tous à la
rotation de l'arbre les accélérerait donc,
sivement d'une manière très notable, ce
de la roue hydraulique. Pour régulariser
rait adapter un volant à l'arbre des cames
le marteau de M. Cavé, que nous avon
Mais on n'a pas besoin d'avoir recours à
convenablement le mouvement, en donna
sition autre que

soulevé quatre fois ; de sorte que l'arbre fait un quart de tour, depuis le moment où le pilon est saisi par une came, jusqu'au moment où il est saisi par la suivante. Ce quart de tour est subdivisé en quatre parties égales, ou en seizièmes de tour. Si l'on examine la batterie, à partir du moment où le premier pilon à gauche, *fig.* 215, est saisi par une came, on verra que le second pilon entrera en mouvement lorsque l'arbre aura fait $\frac{1}{16}$ de tour ; le troisième pilon commencera à être soulevé après $\frac{2}{16}$ de tour ; le quatrième pilon, après $\frac{3}{16}$ de tour ; puis, après $\frac{4}{16}$ ou $\frac{1}{4}$ de tour, le premier pilon, qui est retombé, sera soulevé de nouveau, et ainsi de suite. Ce qui a lieu pour une batterie a lieu pour chacune des deux autres. De cette manière, la résistance que l'arbre doit vaincre se trouve répartie sur toute la durée de chaque tour, et sa valeur reste sensiblement la même d'un moment à un autre. Le mouvement de rotation de l'arbre doit donc être sensiblement uniforme.

Au-dessous de chaque batterie existe une auge, dans laquelle tombent les pilons ; c'est dans cette auge qu'on met le minerai à pulvériser. Les pilons, qui sont de fonte, viennent choquer les morceaux de minerai qu'ils rencontrent en tombant, et les brisent en parcelles de plus en plus petites. Un petit courant d'eau, pris sur le canal qui fournit l'eau à la roue, est amené par le tuyau D, *fig.* 214, et par la rigole E, de là il passe dans l'auge, et en sort par une grille que montre la *fig.* 215, pour se rendre dans une autre rigole F. Ce courant d'eau, en traversant les matières qui sont soumises à l'action des pilons, entraîne les parties déjà réduites en poussière, et les dépose plus loin, dans des bassins auxquels aboutit la rigole F.

C'est par une disposition analogue qu'on fait mouvoir les pilons de bronze qui servent à la fabrication de la poudre.

§ 158. **Sonnettes.** — Pour enfoncer des pieux dans le sol, il faut exercer sur leur tête une très forte pression, afin de vaincre les résistances qui s'opposent à leur enfoncement. Il serait difficile de produire cette pression, en chargeant la tête du pieu d'une quantité suffisante de corps pesants : aussi a-t-on recours à des chocs, qui permettent d'exercer la pression dont on a besoin, à l'aide d'une masse beaucoup moins grande. Quand il s'agit de pieux de petite dimension, on frappe simplement sur leur tête avec de forts marteaux qu'on manœuvre à la main. Mais cela ne serait plus suffisant pour les pieux très longs et très gros qu'on a besoin d'enfoncer dans les grands travaux hydrauliques, tels que la construction des ponts : on est obligé, dans ce cas, d'employer des machines nommées *sonnettes*, à l'aide desquelles on peut faire tomber un corps très pesant sur la tête du pieu, et produire par conséquent un choc dont l'in-

tensité soit en rapport avec la grandeur de la résistance à va

La sonnette la plus simple est celle qui est désignée sous l de *sonnette à tirande*, et que représente la *fig.* 216. Une ma

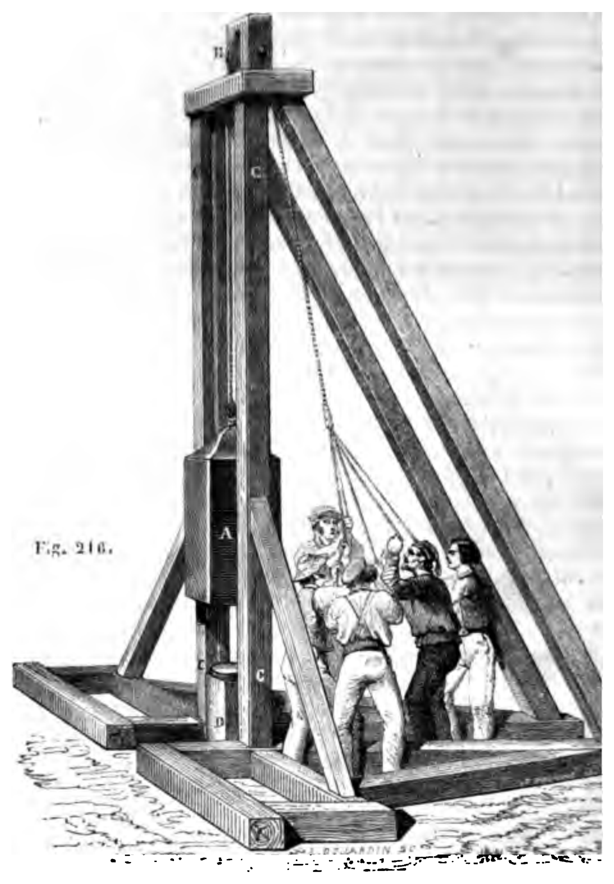


Fig. 216.

fonte A, nommée *mouton*, est attachée à l'extrémité d'une cette corde s'élève, passe dans la gorge d'une poulie B, red *ensuite*, et se termine par plusieurs cordons. Des ouvriers *ensemble* ces différents cordons, et font ainsi monter le

ont élevé autant que cela leur est possible, ils le laissent sans abandonner pour cela les cordons qu'ils tiennent.

est dirigé, dans son mouvement ascendant ou descenleux pièces de bois verticales C, C, entre lesquelles il est se mouvoir. Ces deux montants présentent chacun une ii existe dans toute leur longueur, et dans laquelle sont les oreilles qui font corps avec le mouton. De cette maque le mouton retombe, il vient toujours frapper d'aplomb du pieu D, si celui-ci a été convenablement installé leux montants C, C.

du pieu est ordinairement armée d'une frette de fer, r qu'il ne se fende sous l'action des chocs successifs.

e de sonnette présente des inconvénients, en ce que, si avriers ne cessent pas en même temps de tirer les cors tiennent, ceux qui tirent les derniers peuvent être enle mouton: il pourrait en résulter de graves accidents. ır agir tous exactement de la même manière, les ouvriers uvrent une sonnette à tiraude ont-ils l'habitude de chanrégler leurs mouvements sur leur chant. D'un autre côté, e à tiraude ne permet pas d'élever le mouton bien haut: que, pour exercer un choc très violent, il faut employer n d'un poids considérable. C'est pour obvier à ces divers ents qu'on a imaginé la *sonnette à déclic*.

. La sonnette à déclic a une disposition analogue à celle de te à tiraude. Mais au lieu que la corde se divise en plurdons qui aboutissent entre les mains d'autant d'ouvriers, . s'enrouler sur un treuil à engrenages, *fig.* 217. Deux s A, A, servent à faire tourner un axe B; cet axe porte n qui engrène avec une roue fixée au treuil. En faisant es manivelles, on peut faire monter le mouton aussi haut rmet la charpente de la sonnette. Pour le laisser retomber, faire glisser l'axe B dans le sens de sa longueur, de mao le pignon se place à côté de la roue dentée, et n'engrène e elle: alors le mouton, n'étant plus retenu, tombera en nt la corde, et faisant tourner le treuil et la roue en sens du sens dans lequel on les avait fait tourner précédemment. produire ce déplacement longitudinal de l'axe B, qui supcommunication du pignon avec la roue, on agit sur un le-E, qui peut tourner horizontalement autour du point D. Ce termine, en E, par une fourchette qui embrasse l'arbre B, age *entre deux renflements que* cet arbre présente d'un côté *itre En faisant mouvoir l* extrémité C du levier, horizon-



Fig. 217.

ans un certain sens, l'axe B se transporte en sens con-
:esser pour cela de tourner, si les ouvriers continuent
s manivelles. Une cheville qu'on place dans le voisi-
evier, l'empêche de se déplacer pendant tout le temps
n doit engrener avec la roue.
é de la chute du mouton, produite de cette manière,
ıptement la corde, et détériorerait le treuil, surtout si
ıne forte masse : aussi adopte-t-on une disposition par-
i a pour objet de laisser tomber le mouton seul, et de
uite plus lentement la corde enroulée sur le treuil. Pour
ıpose le mouton de deux parties. La première partie F,
ıi forme la tête du mouton, et qui est directement at-
orde, contient à son intérieur
ui vient saisir un anneau fixé
mouton G. Les deux branches
pince peuvent tourner cha-
d'un point O: lorsque les ex-
se rapprochent, les autres ex-
s'écartent et ne tiennent plus
eux ressorts I s'opposent d'ail-
amment à ce rapprochement
tés H. Voici maintenant com-
. la manœuvre de la sonnette.
ı du corps du mouton étant
s la pince, on fait tourner les
et le mouton s'élève. Au mo-
s'approche de la partie supé-
charpente, les extrémités H de
nnent s'engager dans une ou-
fig. 218, qui se rétrécit de plus
mouton continuant à monter,
t obligée de se resserrer dans
faisant fléchir les ressorts I :
vers le bas, abandonne l'an-
corps du mouton tombe seul.
qu'on agit sur le levier CDE,

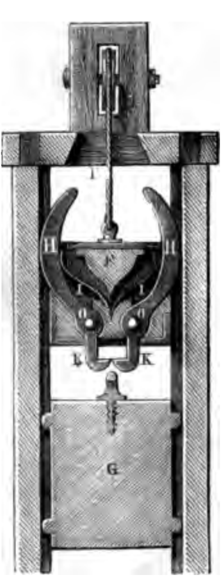


Fig. 218.

rimer la communication des manivelles avec le treuil, et
mouton tombe à son tour, en entraînant la corde. Au
ı la tête du mouton vient choquer le mouton lui-même, la
re, en raison de la forme qu'elle présente à sa partie infé-
nneau se trouve de nouveau saisi, et, en continuant à faire
manivelles, on peut donner un nouveau coup de mouton

§ 160. **Machines qui servent à frapper les**
Pour fabriquer les pièces de monnaie, on comme
alliage ayant la composition voulue ; cet alliage é
coule dans des lingotières, pour en faire des barre
barres sont laminées, jusqu'à ce que leur épaisseur
diminuée : ensuite, à l'aide d'emporte-pièce, on les
delles de la dimension convenable ; et enfin, après
les rondelles ainsi obtenues, et que l'on nomme de
le poids que doivent avoir les pièces de monnaie,
une très forte pression, entre des morceaux d'a
présentent une gravure en creux, afin de leur faire
qu'on voit sur toute leur surface. Ce sont les macl
à cette dernière opération que nous allons décrire.

Il n'y a pas bien longtemps qu'on employait enc
Monnaies de Paris, le balancier monétaire inventé
bre, et dans lequel les flans recevaient leur relief à
Depuis quelques années ce balancier a été rempl
monétaire de M. Thonnelier, dans laquelle les fl
sans choc, et on ne l'a plus conservé que pour frapp
Nous allons faire connaître l'une et l'autre de ces
en commençant par la première.

Le balancier monétaire est représenté dans son
fig. 219. La *fig.* 220 reproduit, à une plus grande

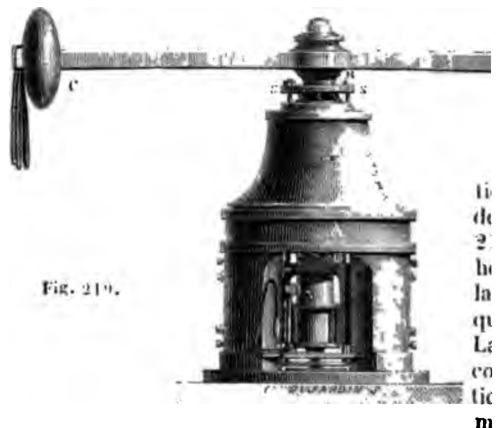


Fig. 219.

ti
de
2
ho
la
qu
La
co
tio
m

AA, formant écrou à sa partie supérieure ; d'une
verse cet écrou ; et d'un levier CC, fixé horizo

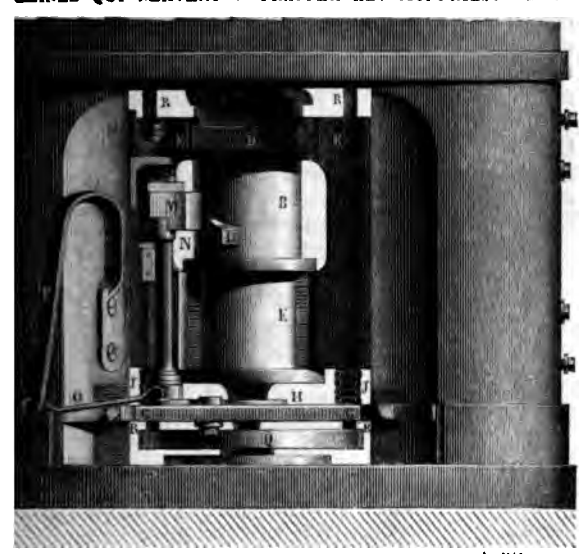


Fig. 220.

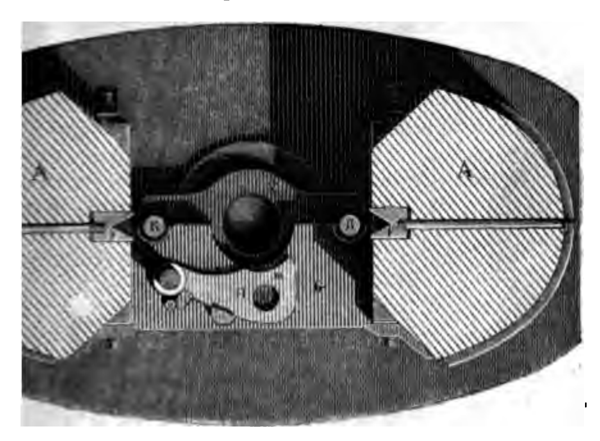


Fig. 221.

u, à la tête de la vis. Ce levier se termine à ses deux

[redacted]

extrémités par deux masses lenticulaires de bronze, a attachées des lanières de cuir, qui servent à le mett ment. Lorsqu'on agit sur le levier, à l'aide de ce manière à le faire tourner dans un sens convenab vis descende, le mouvement se produit et s'entreti l'extrémité inférieure de la vis ne rencontre pas un s'oppose à ce qu'elle descende davantage. Mais, aus obstacle se présente, la vis et le levier sont obligé brusquement, et il en résulte un choc, qui donne l grande pression de l'extrémité inférieure de la vis su l'a subitement arrêtée.

C'est pour augmenter la violence du choc qu'on levier CC par deux masses de bronze, voici comme rendre compte de l'effet qui en résulte. Si l'une de ces animée de la vitesse qu'elle possède lorsque des hor le levier en mouvement à l'aide des lanières, vena directement un obstacle qui s'oppose à ce que son mo tinue, elle produirait un choc, dont l'intensité sera nelle à la grandeur de cette masse, et aussi à la v possédait avant le choc. Si maintenant on considère la produisant un choc par l'intermédiaire du levier et reconnaîtra aisément, d'après le § 72, que la gran auquel elle donnera lieu sera à la grandeur du cho duirait directement, dans le rapport même du chemi court pendant que la vis fait un tour, au pas de cett par là que l'addition de masses un peu grandes, aux de du levier CC, doit augmenter d'une manière consid que la vis et le levier auraient exercé sans ces masse

Les morceaux d'acier trempé, qui portent la gravur deux faces de la pièce, se nomment les *coins*. L'un de partie inférieure de la vis, et l'autre est placé au-de mier. Le flan se pose sur le coin inférieur, et, au mo il est très fortement serré entre les deux coins, ce qui tière à pénétrer dans toutes les cavités que présente faces. En même temps le flan est entouré par une es ou *virole* gravée sur tout son contour intérieur, et dest les lettres qui font saillie tout autour de la pièce de

Le coin supérieur, mobile avec la vis, ne doit pas elle; il doit seulement descendre. Pour y arriver, on a la partie inférieure de la vis une rainure circulaire, en f *de poulie*, qui est embrassée par un collier D, *fig.* 2 est fixé à une pièce EE, qu'on nomme la boîte coul

uine de part et d'autre par deux biseaux pénétrant dans deux lisses F, F, *fig.* 221, dans lesquelles elle peut glisser verticale-nt. Lorsque la vis est mise en mouvement, elle tourne dans le lier D : celui-ci, qui ne peut pas tourner, ne fait que monter ou scendre, en entraînant la boite coulante, suivant qu'on fait mou-ir la vis dans un sens ou dans l'autre. C'est à la partie inférieure la boite coulante qu'est fixé le coin supérieur.

Le coin inférieur est simplement posé sur une pièce mobile, ou tule, qui joue un rôle important. Cette rotule, dont le dessous est nvexe, remplit exactement la concavité de même forme d'une osse masse d'acier, qui occupe le milieu de la partie inférieure 1 massif AA. Au moment du choc, la rotule se place dans la cavité ui la contient, de manière à rendre la face gravée du coin inférieur arallele a celle du coin supérieur, et à égaliser ainsi les pressions ui s'exercent dans les diverses parties de la surface du flan.

Si la virole qui sert à former les lettres en saillie du contour de a pièce était faite d'un seul morceau d'acier, la pièce ne pourrait as en sortir, après avoir été frappée : elle y serait maintenue par s lettres mêmes. Aussi emploie-t-on une virole brisée, qui est rmée de trois morceaux de même dimension, et réunis par juxta-osition. Le contour extérieur de ces trois parties de la virole brisée st conique, et elles sont placées à l'intérieur d'un tronc de cône reux dont la grande base est tournée vers le haut. Des ressorts qui soulèvent ces trois pièces, pour les porter dans la partie large le la cavité conique, leur permettent de s'écarter et d'abandonner a pièce qu'elles embrassent. Au moment où un nouveau flan est frappé, la virole brisée est repoussée vers le fond de la cavité co-nique, ce qui oblige ses trois parties à se rapprocher les unes des autres, et fait disparaître toute solution de continuité entre elles.

La machine est disposée de manière à placer elle-même le flan dans la position qu'il doit occuper pour être frappé, et a enlever la pièce aussitôt qu'elle est frappée. Ces deux opérations s'effectuent au moment où la vis B remonte. Au niveau de la face supérieure de la virole brisée, existe une table G, formée de deux parties : on a supposé, dans la *fig.* 221, que la partie postérieure de cette table est enlevée, afin de laisser voir ce qui est au-dessous. Sur cette table se meut une pièce H, qui porte le nom de *main-poseur*, et qui est destinée à la fois a chasser la pièce qui vient d'être frappée, a l'aide de l'échancrure *m*, et à poser au milieu de la virole un flan qu'on a introduit d'avance dans le trou *n*. Pour que la pièce frappée puisse être chassée par l'échancrure *m* de la main-poseur, il faut *que cette pièce soit élevée jusqu'*au-dessus de la virole brisée. A cet

effet, le coin inférieur peut être soulevé par une plaque
sont fixées deux tiges R, R, qui traversent librement
dans toute sa hauteur, et qui aboutissent à un collier S
Quand la vis B monte, les extrémités des filets pousse
de bas en haut; mais bientôt ces filets pénètrent dans
crures pratiquées dans le collier, qui reste stationnaire
le temps que la vis continue à monter, et maintient ain
Q à une hauteur convenable, pour que la face gravée
férieur soit au niveau du dessus de la table G.

Le mouvement est donné à la main-poseur par une c
à la vis B, qui, pendant le mouvement ascendant de cet
saisir une palette M: cette palette, appuyant sur une
porte l'arbre vertical N, le fait tourner, et avec lui la m
qui est attachée à sa partie inférieure. La vis continua
la came L finit par ne plus toucher la palette M que pa
extérieure, qui est cylindrique, la main-poseur ne t
mais alors une saillie de la vis B soulève, en montant
la main-poseur: la palette M est bientôt abandonnée pa
et la main-poseur est ramenée en arrière par le croc
tire le ressort P. Dans ce mouvement rétrograde, la r
qui reste soulevée, pendant quelque temps, par la saill
passe au-dessus du flan qu'elle a déposé au centre de
Lorsque la vis B redescend pour frapper le flan, la ca
contre la palette M, qui cède sans faire tourner l'axe N
ensuite ramenée dans sa position par un ressort: en n
le collier SS et la plaque Q se sont abaissés, le coin i
venu se reposer sur la rotule, et le flan, descendant a
s'est placé à l'intérieur de la virole, dans la positio
occuper pour être frappé.

§ 161. La presse monétaire de M. Thonnelier, qui a ét
au balancier que nous venons de décrire, n'en diffère

en haut, contre la colonne I, par l'action des deux contre-N, action que transmettent le levier M et le montant à four-L. Lorsque la manivelle G soulève le levier H, ce levier

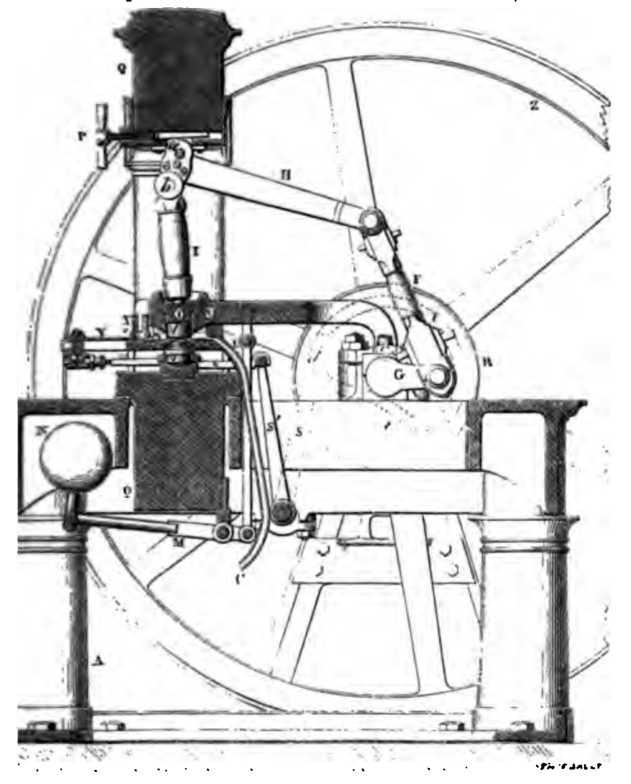


Fig. 222.

à abaisser la colonne I, ainsi que la boite coulante; si d'ail-s les coins sont à une distance convenablement réglée l'un de re, et qu'un flan ait été introduit entre eux, ce flan éprouvera compression extrêmement grande, qui sera suffisante pour pro-e le même effet que le choc dans le balancier monétaire. On se *une idée de la grandeur de* la pression exercée par la colonne *observant combien peu descend* la boite coulante, lorsque

l'extrémité du bras de levier H s'élève d'une quantité notable (§72

La distance entre les deux coins est réglée par une vis de rapp P, qui sert à enfoncer plus ou moins un coin entre le massif Q de la presse, et le tampon d'acier sur lequel se trouve le point fixe du levier H.

Quant aux autres parties du mécanisme, elles agissent à peu près de la même manière que les parties correspondantes du balancier. Voici quel en est le jeu. Un plateau R, monté sur l'arbre du volant, présente une coulisse excentrique *ii*; un bouton *j*, qui pénètre dans cette coulisse, est fixé à l'extrémité supérieure du bras de levier S; et ce bras de levier, attaché inférieurement à un axe horizontal, prend un mouvement oscillatoire, par suite de la forme de la coulisse *ii*. Ce mouvement se transmet au levier S', qui est attaché au même axe : et la tringle U, *fig.* 223, dont l'extrémité recourbée

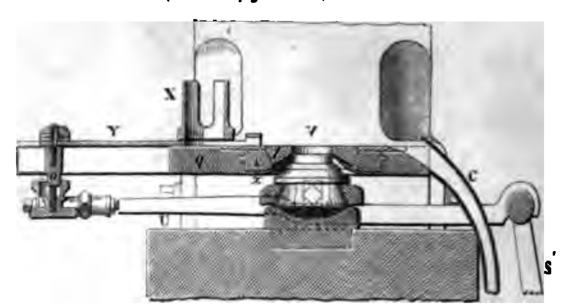


Fig. 223.

s'appuie sur le levier S', reçoit un mouvement de va-et-vient dirigé horizontalement. Dans ce mouvement de va-et-vient, lorsque la tringle U se transporte à droite, la partie inclinée, qui se trouve au milieu de sa longueur, vient soulever le coin inférieur, pour élever la pièce frappée au-dessus des bords de la virole brisée : en même temps cette tringle fait marcher, également vers la droite, la main-poseur Y, qui chasse la pièce frappée dans le conduit C, d'où elle tombe dans une corbeille, et qui dépose ensuite un flan au milieu de la virole. Ici la main-poseur Y se compose de trois parties, comme le montre la *fig.* 224 ; les deux pièces latérales se rapprochent de la pièce du milieu, pour saisir le flan et le poser sur le coin V : mais dès qu'il y est posé, ces deux parties latérales s'écartent, et la main-poseur se reporte vers la gauche, en abandonnant le flan. Y est un gobelet, dans lequel on dépose une pile de flans, que la

[redacted]

poseur prend un à un par-dessous, pour les porter sur le coin.
j. 223 et 224 montrent la disposition de la virole brisée, telle

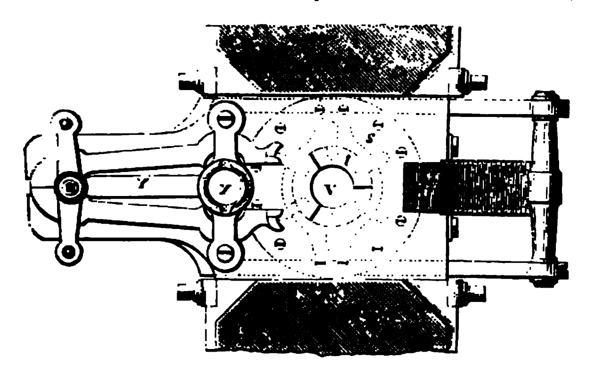


Fig. 224.

elle a été indiquée précédemment pour le balancier : *q* est le porte-
le : *s* le cercle de la virole, qui présente intérieurement une ca-
conique : *t* la virole brisée en trois parties : *x* les ressorts qui
vent à tenir la virole brisée ouverte et à fleur du porte-virole.
Les *fig.* 222, 223 et 224 se rapportent à la presse monétaire,
e qu'elle a été construite par M. Thonnelier ; plusieurs modifica-
s ont été apportées aux parties accessoires de cette machine,
uis qu'elle fonctionne à l'hôtel des Monnaies de Paris : mais les
ties essentielles, celles qui servent à exercer la pression néces-
e pour modeler les pièces de monnaie, n'ont été nullement mo-
ées.

La presse monétaire présente plusieurs avantages sur le balancier
elle a remplacé. D'abord elle permet d'exercer toujours la même
sion pour frapper les flans, ce qui donne lieu à des résultats
réguliers : tandis que la force des hommes employés à ma-
uvrer le balancier présentait des irrégularités notables. D'un
e côté, si l'on oubliait de mettre un flan entre les coins du ba-
ier, ces deux coins choquaient l'un contre l'autre et se brisaient :
is que dans la presse, les deux coins ne viennent jamais en
act, lors même qu'il n'y aurait pas de flan entre eux. Un troi-
ne avantage consiste dans la rapidité de l'opération : une presse
étaire frappe environ 60 pièces à la minute, et peut ainsi fonc-
ner pendant longtemps sans avoir besoin de s'arrêter ; tandis
le balancier frappait beaucoup moins de pièces par minute, et

les ouvriers avaient besoin de se reposer de temps e
le gobelet X, dans lequel on met une pile de flans, d
d'un ouvrier exclusivement chargé de mettre les fl
de la main-poseur.

Les balanciers sont maintenant exclusivement
frapper les médailles.

§ 162. **Horlogerie.**—Nous savons que, dans
uniforme, les chemins parcourus sont proportionnels
ployés à les parcourir Un pareil mouvement est én
pre à la mes
puisqu'il ramè
à celle de l'e
par le corps qu
dans la consti
chines destiné
temps, a-t-on
produire un m
forme. Mais,
sant, on rec
extrêmement
ver. Pour qu'
meuve toujou
vitesse, il fau
sance qui lui
fasse constam
aux résistance
vaincre. Si la
serve toujours
deur, la puiss
constamment
intensité ; si
viennent à vari
doit varier dan
et d'une quant
pour que l'équi
tes ces forces n
blé. Or, on cor
grand nombre



Fig. 225.

de toute espèce qui se développent dans le mouvem
chine, qu'on doit rencontrer de grandes difficultés,
la puissance de telle sorte qu'elle fasse équilibre à
à toutes ces résistances ; et on le concevra d'a

ue les résistances changent souvent d'un moment à
manière purement accidentelle, suivant les variations
'e, d'humidité, etc. Nous allons voir par quels moyens
u, non pas à lever ces difficultés, mais à les éluder en
:, pour atteindre le même but, dans la construction
et des montres.

; moteurs employés pour faire mouvoir les mécanismes
. mesurer le temps sont de deux espèces différentes :
ooids et des ressorts.

agir un poids comme moteur d'une horloge, on le sus_
:mité d'une corde qui est attachée sur la surface d'un cy
n-
et
r-
re
ır
e.
'e
er
›n
s.
n-
à
lui
ue
ent
et
ent
au
par
en-
ée
.
rts
oie
o-

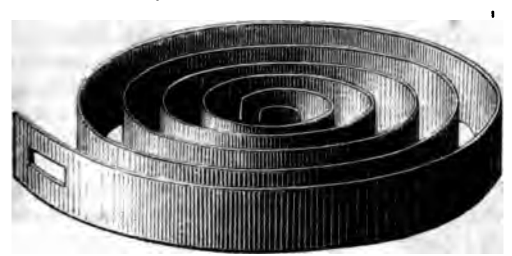


Fig. 226.

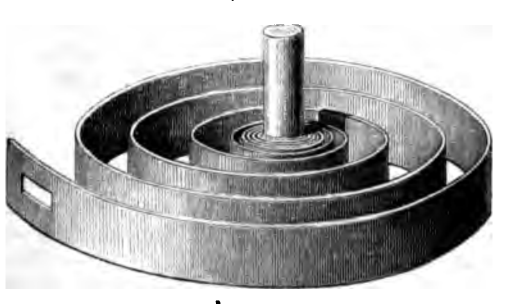


Fig. 227.

: les mécanismes d'horlogerie, sont des lames d'acier
rès longues, qui ont été travaillées de manière à s'en-
es-mêmes en spirales, comme le montre la *fig.* 226.
que l'extrémité extérieure du ressort soit attachée
t fixe, et que l'extrémité intérieure soit liée à un axe
de tourner sur lui-même : lorsqu'on fera tourner cet

axe dans un sens convenable, il entraînera avec lui intérieure du ressort, les spires se serreront de plus son contour, et le ressort prendra la forme indiq *fig.* 227. Si l'on abandonne ensuite l'axe à lui-même, qui tend à reprendre sa forme primitive, lui imprime vement de rotation : c'est ce mouvement que l'on trans canisme d'horlogerie, à l'aide d'engrenages. Il es l'extrémité intérieure du ressort pourrait être tout à que, si l'extrémité extérieure était attachée à une pi tible de tourner autour de l'axe du ressort, elle com également un mouvement de rotation à cette pièce.

Si l'on compare l'action du ressort dont on vient de p tion d'un poids, on verra qu'il y a une différence ess poids moteur agit toujours avec la même intensité; ta force du ressort va constamment en diminuant, depuis où il commence à agir, jusqu'au moment où il a rep primitive. L'avantage que présente l'uniformité d'action se retrouve donc plus dans l'emploi d'un ressort, et n que cette uniformité d'action est essentielle à la march du mécanisme. Pour faire disparaître l'inconvénient qu les ressorts, sous ce point de vue, on a imaginé de les fa l'intermédiaire d'une *fusée*, qui a pour objet de rendre constante. A cet effet on enferme le ressort dans un *fig.* 228, qu'on nomme le *barillet*; sur la surface de est fixée l'extrémité d'une chaîne articulée B, qui, apr

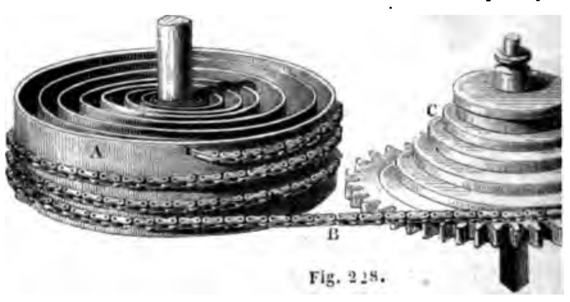


Fig. 228.

un certain nombre de tours sur cette surface, vient sur une sorte de tambour conique C, et s'y fixe par extrémité. C'est ce tambour conique qui porte le nom *il présente* une rainure, en forme d'hélice, dans laquelle *placer les* tours successifs de la chaîne. Lorsque le res

[redacted]

. tendu, la chaîne est enroulée sur toute la surface de la
e s'en détache du côté de sa petite base, et vient se termi-
ı surface du barillet, qu'elle ne touche que dans une petite
. Le ressort a son extrémité intérieure fixe, et son extrémité
e attachée à la circonférence du barillet; en se détendant, il
ıer le barillet, et communique un mouvement de même sens
, par l'intermédiaire de la chaine. Celle-ci se déroule sur la
, s'enroule sur le barillet, et le mouvement ne cesse de se
que lorsqu'elle s'est entièrement déroulée sur la fusée, de
à s'en détacher du côté de la grande base. On voit que, pen-
t ce mouvement, la tension de la chaine qui est produite
rce du ressort va constamment en diminuant; mais aussi
sion agit sur la fusée à l'extrémité d'un bras de levier de
plus grand; et l'on conçoit qu'on ait déterminé la forme de
de manière qu'il y ait une compensation exacte, c'est-à-
manière que l'action de la chaine produise le même effet
orce constante appliquée à l'extrémité d'un bras de levier
le. Le mouvement de rotation que prend la fusée, sous l'ac-
a chaîne, se transmet à tout le mécanisme, par l'intermé-
e la roue D, que la fusée entraine en tournant.

. Le moteur, quel qu'il soit, fait tourner un arbre, ainsi
s venons de le voir: une roue dentée, mobile avec cet ar-
rène avec une autre roue dentée plus petite, ou pignon, qui
sur un second arbre parallèle au premier; ce second arbre
on tour une roue dentée qui engrène avec un pignon fixé
isième arbre de même direction: et ainsi de suite. Si la
porte le premier arbre a six fois plus de dents que le pi-
ec lequel elle engrène, le second arbre tournera six fois
que le premier; si la roue du second arbre a quatre fois
lents que le pignon qui lui correspond, le troisième arbre
quatre fois plus vite que le second, et, par conséquent,
atre fois plus vite que le premier. En continuant de cette
on reconnaîtra que le mouvement de rotation du premier
transforme dans des mouvements de rotation du 2e arbre,
bre, du 4e arbre,.... de plus en plus rapides: et le rapport
ses de deux arbres consécutifs sera toujours le même que
nombres de dents de la roue et du pignon qui transmet-
ouvement de l'un à l'autre.

. Après avoir fait connaitre la disposition des rouages
orloge ou d'une montre, et le moteur qui met ces rouages
ement, il ne nous reste plus qu'à montrer comment on ré-
e mouvement, de manière à faire mouvoir uniformément.

sur un cadran, une ou plusieurs aiguilles destinées à s dicateurs pour la mesure du temps.

Nous avons dit que, pour rendre le mouvement unifor lait établir un équilibre permanent entre la puissance et l des résistances. On y parvient en adaptant au dernier mécanisme, à celui dont la vitesse est la plus grande, d qui viennent choquer l'air pendant leur mouvement. La indique la disposition q habituellement à ces elles sont au nombre de rectement opposées l'une et formées simplement d que mince rectangulaire traversée au milieu de par l'axe avec lequel tourner. La résistance leur oppose varie propor ment au carré de leu (§ 129). Il en résulte que, mouvement commence duire, la résistance qu' ces palettes est très faible : la force du moteur est trop gr qu'il y ait équilibre, et par suite la vitesse de toute l augmente. L'accélération du mouvement détermine un ment de la résistance éprouvée par les palettes, et la m teint bientôt une vitesse telle, que la puissance fait équ résistances : dès lors le mouvement ne se modifie plus ; il forme tant que la puissance conserve la même intensité.



Fig. 229.

La nature de la résistance employée ici, pour arriver vement uniforme, présente un avantage important, qui c ce que sa grandeur dépend de la vitesse du mouvemen une cause quelconque, la vitesse était trop grande, les r l'emporteraient sur la puissance, et le mouvement se rale au contraire, la vitesse était trop faible, la puissance l'er à son tour sur les résistances, et le mouvement s'acc Ainsi l'emploi de la résistance de l'air, pour régulariser ment d'un mécanisme d'horlogerie, ne permet pas seuleme nir un mouvement uniforme, mais encore elle fait qu vement ne peut avoir lieu qu'avec une vitesse détermin serait pas de même, si les résistances et la puissance étai *indépendantes* de la vitesse du mouvement : l'équilibre en *ces forces* ferait que le mouvement de la machine serai

nerait en aucune manière la vitesse de ce mouve-
iit indifféremment être lent ou rapide.
i vient d'être dit, la vitesse déterminée que prend
horlogerie, dont le mouvement est régularisé par la
r, dépend de la grandeur de la puissance ; puisque
e devient uniforme que lorsque la résistance op-
ıx palettes, jointe aux autres résistances passives,
ire équilibre à cette puissance. Pour que le mou-
enne pendant un certain temps avec une vitesse
ıt donc que la puissance agisse pendant tout ce
ème intensité. C'est ce qui aura lieu, si l'on se sert
ne moteur ; mais si l'on emploie un ressort, il sera
faire agir par l'intermédiaire d'une fusée.
ɔyen qui vient d'être indiqué, pour régulariser le
aisse excellent, il ne fournit cependant pas un mou-
:gulier pour pouvoir servir à la mesure du temps.
que les palettes rencontrent en tournant, ne se
ıjours à elles dans des conditions identiquement
ıoindre courant qui existe dans l'air environnant
:e dont elles sont retardées dans leur mouvement.
le moindre changement qui arrive dans la gran-
sance, et dans les frottements des diverses pièces
autres, trouble l'équilibre, et la vitesse varie de
blir, en faisant varier en conséquence la résistance
palettes de la part de l'air. Aussi n'emploie-t-on de
ıes, dont le mouvement est régularisé par la ré-
, qu'à des usages pour lesquels on n'a pas besoin
ıussi parfaite que pour la mesure du temps. On s'en
rnebroches, pour faire mouvoir des pompes dans
el, pour faire tourner les figures de cire qui sont
s boutiques des coiffeurs, etc. On s'en sert encore
in de produire un mouvement uniforme de courte
ans l'appareil de M. Morin, destiné à l'étude des
les corps (§ 90). C'est aussi un mécanisme de cette
mployé dans les horloges, pour la partie de la ma-
elle la *sonnerie*. Dans les anciens tournebroches,
ı poids comme moteur, et la vitesse restait toujours
même. Mais dans la plupart des cas qui viennent
noteur est un ressort qui agit directement sur les
ouvement, tout en étant régulier à un moment quel-
ıtit peu à peu, jusqu'à ce qu'il s'arrête tout à fait.
ɔuvant produire, par le moyen qui vient d'être

indique, ni par aucun autre, un mouvement assez uniforme
servir à la mesure du temps, on est obligé de se contenter
mouvement périodiquement uniforme, dont la réalisation, t
présentant aussi de grandes difficultés, peut cependant être ob
d'une manière plus complète. A cet effet, on emploie une pièce
ticulière, qui oscille régulièrement, et qui, à chaque oscillation,
rête entièrement le mouvement des rouages. De cette manière
mouvement est intermittent, et les aiguilles qui servent à mar
le temps sur un cadran, au lieu de tourner avec continuité,
marchent que par saccades; mais la quantité dont elles se dé
cent à chaque fois est ordinairement si faible, que l'œil ne peut
apercevoir, et que leur mouvement présente, en définitive, l
parences d'un mouvement continu extrêmement lent. Ce n'est
lorsqu'une aiguille marche assez rapidement sur un cadran, com
les aiguilles qui marquent les secondes, que ce mouvement disc
tinu devient sensible.

La pièce oscillante, dont nous venons de parler, et dont les o
cillations doivent servir à arrêter périodiquement le mouvement d
rouages, porte le nom de *régulateur*. Les pièces qui sont destiné
à établir une liaison entre les rouages et le régulateur, par l'inte
médiaire desquelles celui-ci arrête à chaque instant le mouveme
produit par le moteur, constituent ce que l'on nomme l'*échappem*

§ 167. Le premier régulateur qui ait été employé pour les h
loges et les montres consiste en une roue métallique, massive à
circonférence, et mobile autour d'un axe sur lequel elle est fixée
son centre. Cette roue, espèce de petit volant, qu'on désigne s
le nom de *balancier*, ne prend pas d'elle-même un mouvement d'o
cillation autour de son axe, après qu'on lui a donné une impulsi
initiale; mais ses oscillations sont produites par l'action du mote
lui-même, action qui se transmet par l'intermédiaire des rouages
de l'échappement. C'est ce que fera bien comprendre la *fig.* 230, q
est destinée à montrer en même temps la disposition générale d'u
montre: elle a été construite en écartant les roues les unes d
autres, dans le sens de la hauteur, et en plaçant leurs axes sur
même plan, afin de faire voir d'une manière plus nette tous
détails de cette disposition.

Le ressort A, dont l'extrémité extérieure est fixe, tend à faire to
ner l'axe auquel est attachée son extrémité intérieure. Cet axe po
une roue à rochet B, qui agit sur la roue dentée C, par l'intermédi
du doigt *o*. La roue C fait tourner le pignon D, et par suite la roue
celle-ci fait tourner le pignon F, et la roue G; la roue G communi
son mouvement au pignon H, et l'axe de ce pignon fait tourner

[redacted]

intermédiaire de la roue K et du pignon L, qui font
ıcs d'angle. En avant de la roue M, qui porte des dents
ıarticulière, passe l'axe du régulateur N ; cet axe est

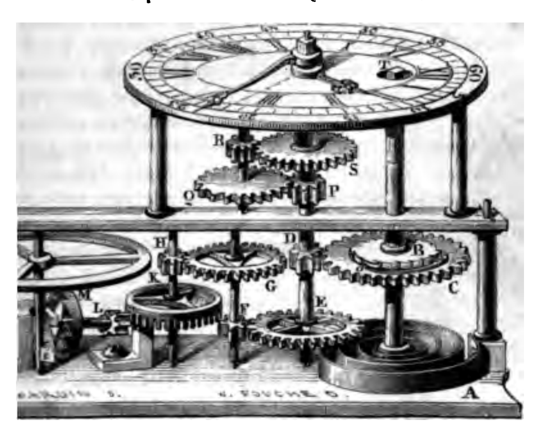


Fig. 230.

s palettes *i*, *i'*, dirigées à angle droit l'une sur l'autre, regard de la partie supérieure et de la partie inférieure , de manière à pouvoir être rencontrées par les dents ı, qui porte le nom de *roue de rencontre*. Lorsque la ses dents viennent alternativement choquer les deux La palette *i* reçoit une impulsion qui la fait mouvoir 'arrière. Mais bientôt l'autre palette *i'* vient se mettre ı d'une dent de la roue M : elle en reçoit une impulsion en avant. La palette *i* se trouve alors de nouveau plare à être rencontrée par les dents de cette roue ; elle › en arrière, et ainsi de suite.

ment est ici formé de la roue de rencontre M, et des *i*, *i'* ; on le nomme *échappement à recul*, parce que, u'une des palettes vient choquer une des dents de la ıcier, qui n'a pas encore perdu tout son mouvement, roue d'une certaine quantité. Le mouvement n'est ré- d'une manière imparfaite par l'emploi du balancier et ment à recul. Chaque mouvement que prend le balan- ommuniqué par l'action d'une dent de la roue de ren- ıe *des palettes*, et ce mouvement s'effectue avec une



indiqué puisse être employé, il est de toute nécessité que la
moteur soit aussi constante que possible, et que les divers frot
qui se produisent pendant toute la durée du mouvement pré
une grande uniformité.

§ 168. La *fig.* 230 fait voir de quelle manière les roua
marcher, sur un même cadran, et avec des vitesses différent
guille des heures et l'aiguille des minutes. L'axe de la roue E
longe, et c'est à son extrémité qu'est fixée l aiguille des mi
faut donc que le ressort moteur et le régulateur soient disposé
nière que cet axe fasse un tour entier en une heure. Sur c
axe est monté un pignon P, qui engrène avec une roue Q ;
de la roue Q porte un pignon R, qui engrène avec une roue
dernière roue est fixée à un cylindre creux, dans lequel pas
ment l'axe de l'aiguille des minutes, et c'est à l'extrémi
cylindre creux qu'est adaptée l'aiguille des heures. De cette
les deux aiguilles se meuvent circulairement autour d'u
centre, et cependant elles ne sont pas animées du mêm emou
Le pignon P a 8 dents, et la roue Q, 24 ; l'aiguille des min
donc trois tours, pendant que la roue Q en fait un. D'un au
le pignon R a 8 dents, et la roue S en a 32 ; en sorte que l
fait quatre tours, pendant que la roue S en fait un. La roue S
un tour pendant que l'aiguille des minutes en fait douze, et

la roue E et le pignon D, et l'autre porte le pignon P et l'aiguille minutes. L'un de ces deux axes est creux à son extrémité, et e axe pénètre à frottement dans cette cavité ; en sorte que l'un eux axes venant à tourner par une cause quelconque, l'autre ıera en même temps, à moins qu'il n'éprouve une résistance ca- de vaincre le frottement qui se développe entre eux. Lorsque la E tourne, elle entraine le pignon P, et par suite les aiguilles, qui résentent qu'une faible résistance. Mais si au contraire on veut tre les aiguilles à l'heure, en faisant tourner directement l'aiguille minutes, l'axe de cette aiguille n'entrainera pas l'axe de la E dans son mouvement, à cause de la résistance opposée par t le mécanisme, qui devrait se mouvoir en même temps que la e E. L'aiguille des minutes ne fait tourner avec elle que les roues pignons P, Q, R, S, et l'aiguille des heures et tous les autres ıages restent en repos.

§ 169. Le ressort, qui met tout le mécanisme en mouvement. . 230, ne peut pas agir indéfiniment : lorsqu'il est détendu, il est cessaire qu'on le tende de nouveau, pour que le mouvement con- ıue : c'est ce qu'on appelle *remonter* l'horloge ou la montre. Pour ndre le ressort A, on adapte une clef à l'extrémité carrée T de axe auquel il est attaché intérieurement, et l'on fait tourner cet axe ans un sens contraire à celui dans lequel l'action du ressort le fait abituellement tourner. Si la roue C était fixée à cet axe, elle tour- erait avec lui, pendant qu'on tendrait le ressort, et elle entraine- ait nécessairement tout le mécanisme, y compris les aiguilles, dans e mouvement rétrograde. Pour que cela n'ait pas lieu, on fait agir axe du ressort moteur sur la roue C, par l'intermédiaire d'une roue rochet B, et d'un doigt *o*, sur lequel appuie constamment un petit essort de pression. De cette manière la roue C n'est entrainée par l'axe, que lorsque celui-ci cède à l'action du ressort moteur ; et lors- qu'on fait tourner cet axe en sens contraire, pour remonter le ressort, l n'entraine que la roue à rochet B, dont les dents passent succes- ivement sous le doigt *o*, en faisant entendre un bruit que tout le onde connait. Par suite de cette disposition, les roues et les aiguilles estent immobiles pendant toute la durée du remontage.

§ 170. Revenons maintenant à l'étude des régulateurs. L'emploi un pendule, pour régulariser le mouvement d'une horloge, a été ıaginé par Huyghens, en 1657. C'est à ce régulateur qu'est due grande précision avec laquelle les horloges bien construites mar- ıent le temps. Quels que soient les soins qu'on mette à disposer le écanisme, *de manière que le régulateur soit soumis à des actions nstantes de la part du moteur*, on ne peut jamais y arriver qu'im-

parfaitement ; il est donc très important que le régulateur so telle nature, que la durée de ses oscillations ne soit pas inf par la variation de ces actions. Or c'est précisément ce qu pour le pendule, dont les oscillations, pourvu qu'elles soient ont une durée indépendante de leur amplitude. Si l'amplitu oscillations du pendule, employé comme régulateur, se trouv augmentée, tantôt diminuée par l'effet du moteur, leur dur restera pas moins toujours à très peu près la même, et par mouvement de l'horloge sera convenablement régularisé. C cependant pas une raison pour négliger de rendre l'action du sur le régulateu uniforme que ble, lorsque l'o arriver à un très degré de per dans la mesu temps.

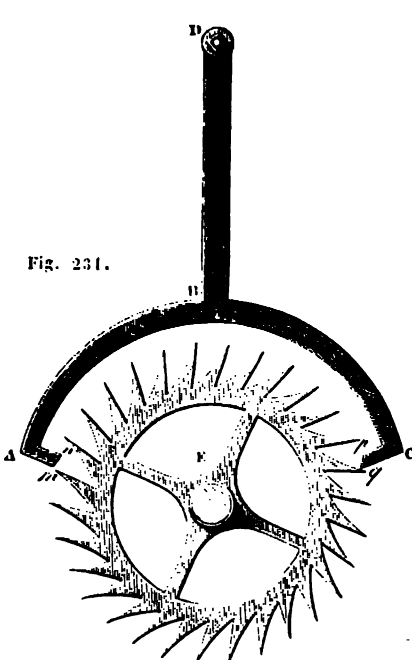


Fig. 231.

L'échappemen emploie habit ment pour fair muniquer les m d'une horloge a dule régulateu l'*échappement* à que nous allon crire, et qui présenté par 231. Une pièc en forme d' est suspendue axe horizontal peut librement ner autour de Cette ancre re pendule un ment oscillatoi tour de son suspension. En deux extrémités A et C se trouve une roue E, qui est fixée au arbre du mécanisme de l'horloge, et à laquelle le moteu *constamment* à donner un mouvement de rotation. Les d *cette roue* viennent alternativement s'appuyer sur la f

. partie A de l'ancre, et sur la face supérieure de la
es deux faces sont d'ailleurs taillées suivant des arcs
oncentriques à l'axe D ; en sorte que, pendant tout
ı'une dent de la roue E est arrêtée par l'une des ex-
l'ancre, cette dent, et par suite la roue,
étement immobile. C'est le contraire de
t lieu dans l'échappement à recul, où
nt de la roue de rencontre se mouvait
nt, pendant qu'elle était en contact avec
ui l'empêchait de passer.
x extrémités A et C de l'ancre présen-
côté de la roue, deux parties *mn*, *pq*,
n sens contraires, sur lesquelles les dents
s doivent glisser avant d'échapper. Au
ı ce glissement se produit, la dent exerce
ı une pression qui tend à augmenter sa
l'ancre réagit de son côté sur le pendule
tenir son mouvement. Sans la présence
x petits plans inclinés, l'amplitude des
, du pendule décroîtrait progressivement,
les résistances occasionnées par l'air et le
ıspension du pendule, et aussi en raison
ui proviennent du frottement de la roue
nent sur les faces de l'ancre : ces résis-
ıdraient, au bout de peu de temps, les
; du pendule assez petites pour que les
a roue E n'échappent plus, et l'horloge
t.

D

G

Fig. 232.

232 montre de quelle manière l ancre est
mmunication avec le pendule. L'axe hori-
ıuquel elle est fixée, porte à un bout une tige F, qui se
férieurement par une fourchette horizontale G. La tige
: passe entre les branches de cette fourchette : en sorte
ndule ne peut pas osciller, sans que l'ancre oscille en
ps.
échappement à recul, le moteur agissait constamment sur
ıur pour modifier son mouvement. Il n'en est pas de même
ıppement à ancre, où l'influence du moteur sur le régula-
ıaru en grande partie ; cette influence n'existe plus que
ttement des dents de la roue d'échappement sur les faces
frottement *qu'on peut rendre* presque nul, et dans les
que l'ancre reçoit des dents, au moment où elles échap-



entre l'aiguille des minutes et la roue d'échappement. Po
puisse régler une horloge, c'est-à-dire l'empêcher d'aller
ou trop lentement, il est nécessaire qu'on puisse modifie
dule, afin de l'amener à effectuer ses oscillations dans u
convenable. Pour cela on ne fixe pas la lentille du pend
tige; elle est simplement traversée par cette tige, et soute
un écrou, qui est vissé sur la tige, et qu'on peut faire mon
ou moins. Lorsque l'horloge va trop vite, cela vient de ce
oscillations du pendule ont une trop courte durée; on les
en abaissant la lentille. Si au contraire l'horloge va tro
ment, on relève la lentille. Dans les pendules de chemin
adopté une disposition un peu différente: la lentille est fi
tige, et le tout est suspendu à un fil de soie, qu'on all
qu'on raccourcit, suivant que la pendule avance ou retard

§ 171. Les *fig.* 233 et 234 montrent la disposition d'
loge dont le mouvement est régularisé par un pendule et u
pement à ancre. Le poids moteur A agit à l'extrémité d'u
qui est enroulée sur le cylindre B; il tend à faire tourne
lindre, et par suite la roue C; cette roue C engrène avec u
D, dont l'axe porte une deuxième roue E: le pignon F engrè
roue E, et sur son axe est fixée une troisième roue G; cette
roue engrène à son tour avec le pignon H, sur l'axe duquel
une quatrième roue K: enfin la roue K engrène avec le p
dont l'axe porte la roue d'échappement M. L'ancre NN
autour de l'axe O, embrasse la partie supérieure de la

ier en 60 secondes ou une minute. Le pignon H, b de la roue K, se prolonge à gauche de la figure, nent engrène avec une roue c, fixée à un cy- i enveloppe l'axe de l'aiguille des secondes, et qui des minutes. A côté de la roue c, et sur le même ·xiste une seconde roue d, qui engrène avec une

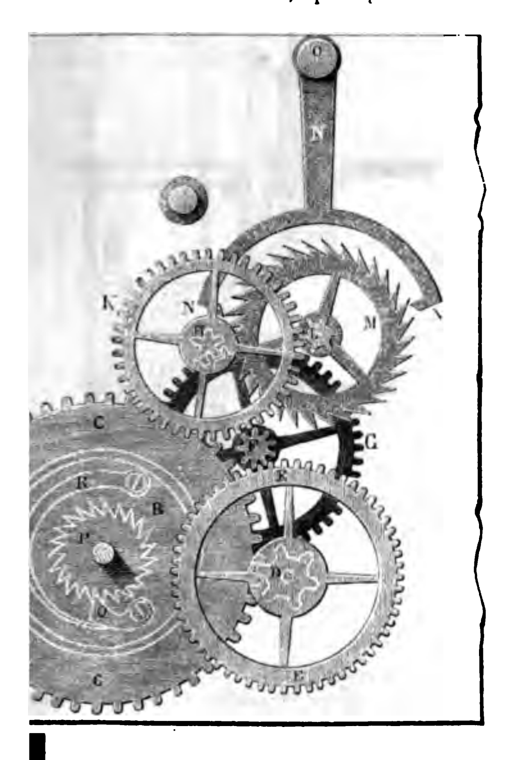


Fig. 233.

ɜ la roue e porte un pignon f, qui engrène avec la oue g est fixée à un second axe creux, qui enve- ent, et qui porte l'aiguille des heures.
vids moteur a fait dérouler, en descendant, toute la



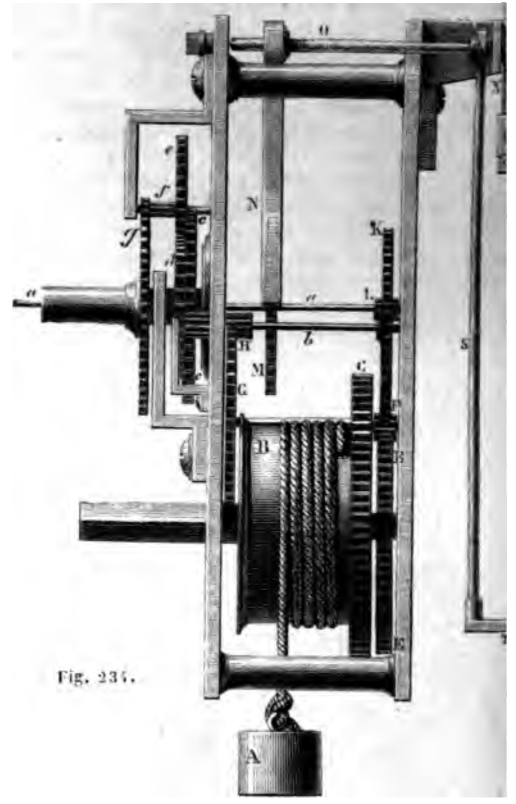


Fig. 234.

corde qui était enroulée sur le cylindre B, il ne peut plus continuer à agir, à moins qu'on n'enroule de nouveau la corde, en faisant remonter le poids. Pour cela, on fait tourner le cylindre B dans un sens convenable, à l'aide d'une clef. Tous les rouages seraient entraînés dans ce mouvement rétrograde, si l'on n'avait pas adapté au cylindre un appareil semblable à celui que nous avons déjà vu sur la *fig.* 230, et qui était destiné *à remplir* le même objet. Une roue à rochet P, *fig.* 233, *est fixée* à l'axe du cylindre B, et tourne nécessaire-

[redacted]

ce cylindre, dans quelque sens qu'il se meuve. Un doigt Q entre les dents de la roue P ; et un ressort R maintient ce stamment appuyé sur la roue. Le ressort et le doigt sont la roue dentée C. Lorsque le cylindre B tourne sous l'action moteur A, il fait tourner la roue C, par l'intermédiaire de rochet et du doigt ; mais lorsqu'on fait tourner le cylindre en traire, pour remonter le poids, les dents de la roue à rochet successivement sous le doigt, et la roue C ne tourne pas.

. Les avantages que présente l'emploi d'un pendule, comme ur, sont exclusivement réservés aux horloges fixes, car il clair que les mouvements divers, souvent brusques, que doi- evoir les horloges portatives ou montres, troubleraient com- nt les oscillations du pendule et le jeu de l'échappement. nc été obligé d'imaginer pour les montres un régulateur spé- i ne fût pas incompatible avec la mobilité de la machine tout , et qui présentât en même temps, autant que possible, les ges du pendule. Le balancier régulateur, décrit précédemment), satisfait bien à la première condition ; mais il est loin de re à la seconde. Nous avons vu en effet que ce régulateur, n'os- pas de lui-même, mais recevant toujours la totalité de son nent du moteur, devait conserver dans ses oscillations la trace iations de la force que le moteur transmet aux palettes. C'est Huyghens qui a imaginé le régulateur qui est exclusivement é pour les montres.

égulateur n'est autre chose que le balancier dont on vient de muni d'un ressort spiral qui lui donne la propriété d'osciller même, sans avoir besoin pour cela de l'action du moteur. Ce , que l'on nomme simplement le *spiral*, a la même forme que ort moteur décrit précédemment et représenté par la *fig* 226 , est beaucoup plus délié, et a par conséquent beaucoup moins e. Son extrémité intérieure est attachée à l'axe du balancier e le montre la *fig*. 235, et tre extrémité est fixée à es platines de la montre. iral prend naturellement rtaine forme d'équilibre. l'on fait tourner le balan- oit dans un sens, soit dans , le spiral se trouve dé- en vertu de son élasti- l tend *à reprendre la figure* qu'il avait précédemment, et *le balancier vers sa position* primitive. Mais, au moment où

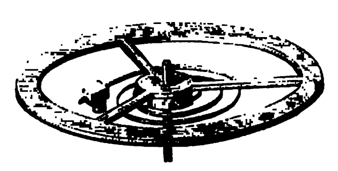


Fig. 235.

le spiral a repris exactement sa figure d'équilibre, le b
animé d'une vitesse en vertu de laquelle il continue à t
le même sens ; le spiral se déforme donc en sens contr
pose au balancier une résistance croissante, qui finit bi
réduire au repos. Alors le spiral, en continuant à agir s
cier, le ramène de nouveau à sa position primitive ; cel
passe, et ainsi de suite. Le balancier muni du spiral,
été dérangé de sa position d'équilibre, oscille donc de par
de cette position, de la même manière qu'un pendule osc
et d'autre de la verticale. On peut dire que le spiral est
cier ce que la pesanteur est au pendule. Il est en outre
tant d'observer que la durée des oscillations du balancier e
dante de leur amplitude, pourvu que le spiral soit conve
construit.

§ 173. Il ne suffit pas que les durées des oscillation
balancier muni d'un spiral soient indépendantes de leur
pour que l'application d'un pareil balancier à un
d'hologerie en régularise complétement le mouvement ;
core que l'échappement soit tel que le balancier soit sou
tant que possible, à l'action du moteur, action qui modi
galement la durée des oscillations, suivant qu'elle serai
moins énergique.

On a employé pendant longtemps, et l'on emploie encor
montres communes, l'échappement à recul, ou à palettes
avons déjà vu dans la *fig.* 230. Dans ce cas la partie du
qui sert à régulariser le mouvement est exactement dispo
l'indique cette figure, avec cette différence cependant q
balancier est muni d'un spiral. La régularité du mouvem
de cette manière est bien plus grande qu'elle n'était a
ploi du spiral ; mais elle laisse encore beaucoup à désir
lancier seul a été perfectionné par l'addition du spiral :
ment a besoin d'être modifié à son tour. Nous allons v
consistent les deux échappements principaux qu'on a s
l'échappement à recul, et qui ont permis d'arriver à u
perfection, dans la mesure du temps par les montres.

Le premier dont nous parlerons est l'*échappement à c*
est appliqué dans toutes les montres plates. L'axe du ba
lieu de porter deux palettes, comme dans l'échappeme
est taillé d'une manière particulière, dans une portion
gueur. La *fig.* 236 montre la forme qu'on lui donne. L
a été réduite à un demi-cylindre évidé ; et, en outre,
crure c a été pratiquée dans ce demi-cylindre. C'est la

, située au-dessus de cette échancrure, qui joue le rôle le
ant. La dernière roue du mécanisme, celle qu'on nomme
ppement, est placée dans un plan perpendiculaire
balancier, et ses dents, qui s'élèvent au-dessus de sa

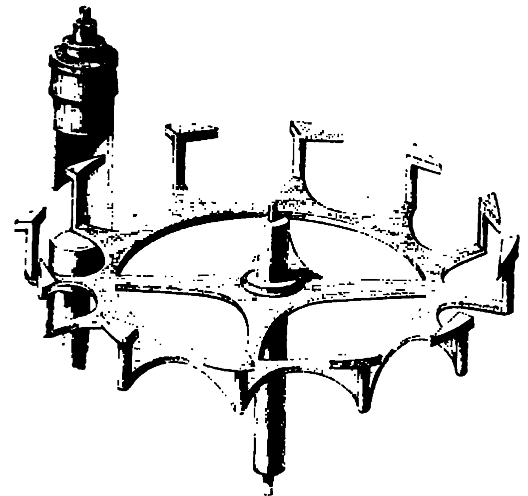


Fig. 237.

ment s'engager dans le cylindre évidé que porte cet axe.
s *fig*. 238 et 239 font voir de quelle manière le cylindre
sse passer successivement les dents de la roue. En vertu
ions du balancier, le cylindre A tourne autour du centre
ans un sens, tantôt dans l'autre. Une dent C vient buter
te contre la surface extérieure du cylindre, *fig*. 238 :
it ce cylindre a pris une autre position, *fig*. 239, et la
i a pu marcher sous l'action du moteur, vient buter de
ntre la face intérieure du cylindre: le cylindre, reprenant
première position, laisse échapper la dent C. et arrête
vante par sa surface extérieure, et ainsi de suite.
l échappement, tant qu'une dent est arrêtée sur l'une des
du cylindre, elle ne tend, en aucune manière, à le faire
ns un sens ou dans l'autre: le cylindre oscille sous la
n du spiral. Cependant le frottement qu'il éprouve de la
ents qu'il arrête, joint aux autres résistances qui s'oppo-
uvement du balancier, tend à diminuer l'amplitude de

ses oscillations : et la montre cesserait bientôt de marcher, si la
teur ne restituait de temps en temps au balancier le mouv
que ces résistances lui font perdre. C'est pour cela qu'on d
aux dents la forme qu'elles présentent extérieurement ; au mo
où la dent C, après avoir glissé sur la face extérieure du cylin
fig. 238, commence à échapper, sa convexité pousse le bord
accélère ainsi le mouvement du balancier. C'est encore po

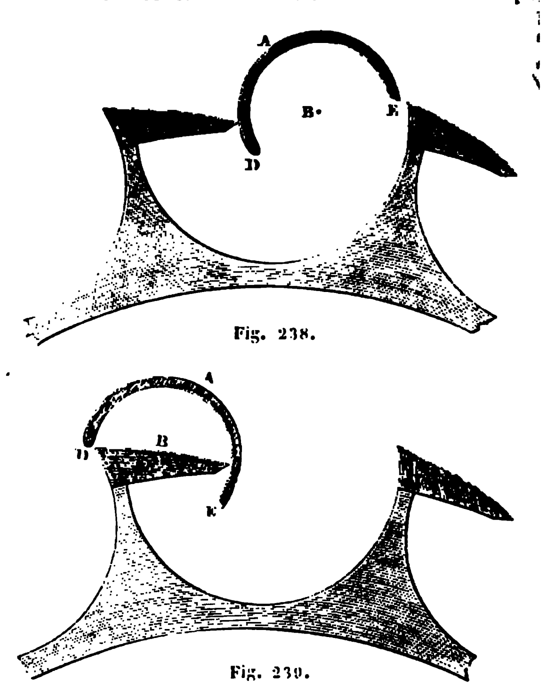


Fig. 238.

Fig. 239.

même raison que l'autre bord E du cylindre est taillé en bise
lorsque l'extrémité de la dent atteint ce bord, elle glisse s
petite face oblique, et donne une impulsion au balancier.

L'échappement à cylindre, que nous venons de décrire, est
le balancier ce que l'échappement à ancre est pour le pen
Dans ces deux échappements, tant qu'une dent est arrêtée, soi
le cylindre, soit par l'ancre, elle reste complétement immobile

[redacted]

ıs l'un, comme dans l'autre, le régulateur est constam- l'influence du moteur, influence très faible, il est vrai, ı'en existe pas moins, puisque les dents frottent sur la les arrête, et qu'ensuite, au moment où elles se mettent ment, elles donnent une impulsion à cette pièce. L'échap- cylindre est excellent, et suffit bien pour les montres ; mais pour la construction des montres marines, qui ıarcher pendant plusieurs mois sans se déranger sensi- on a imaginé un autre échappement, dans lequel on a fait e cette influence continuelle du moteur sur le régulateur, ur cela porte le nom d'*échappement libre*. Voici en quoi il :

ısort A, *fig.* 240, dont l'épaisseur diminue progressivement

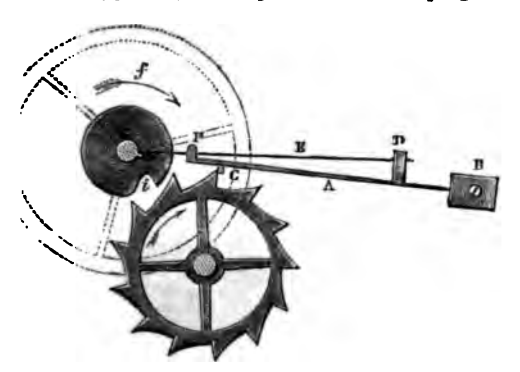


Fig. 240.

ıt à l'autre, est fixé, par son extrémité amincie, dans un talon ssort porte une saillie C, contre laquelle viennent buter suc- nent les diverses dents de la roue d'échappement. Il porte en ı petit talon D, dans lequel est fixé un second ressort très E. Ce second ressort passe sous l'extrémité recourbée d'un F, qui termine le premier ressort; en sorte qu'il peut s'abais- lessous de ce crochet sans que rien s'y oppose : tandis l s'élève, il entraîne le crochet avec lui, et soulève ainsi t A. L'axe G du balancier est muni d'un doigt *a*, qui oscille e temps que lui, et qui rencontre l'extrémité du petit res- chaque oscillation. Lorsque le mouvement a lieu dans le liqué par la flèche *f*, le doigt abaisse le petit ressort en pas- *ıais le ressort A reste immobile*, ainsi que la roue d'échap-

pement. Dans l'oscillation contraire, le doigt *a* soulève le ressort B celui-ci soulève à son tour le ressort A, la dent qu'arrêtait la saillie C passe, et cette saillie, ramenée aussitôt dans sa position par le ressort A, arrête la dent suivante. Au moment où une dent échappe, une autre dent de la même roue d'échappement vient donner une impulsion au bord *i* d'une entaille pratiquée dans un petit disque fixé à l'axe du balancier; de cette manière le moteur restitue au balancier, par une action presque instantanée, le mouvement qu'il a pu perdre, pendant qu'il a effectué deux oscillations. Sauf le moment où cette impulsion est donnée au balancier, on voit qu'il oscille sans être soumis en aucune façon à l'influence de la force du moteur.

§ 174. Nous avons vu que, dans les horloges dont le régulateur est un pendule, il suffisait d'élever ou d'abaisser la lentille du pendule, d'une quantité convenable, à l'aide de l'écrou qui la soutient, pour que l'horloge ne marche ni trop vite ni trop lentement. On a besoin également de pouvoir agir sur le régulateur d'une montre, de manière à atteindre le même but. La durée des oscillations d'un pendule dépend à la fois de l'intensité de la pesanteur qui le fait mouvoir, et de la forme du pendule lui-même; ne pouvant faire varier la pesanteur, pour modifier la durée des oscillations, on est obligé de changer la forme du pendule, et c'est ce qu'on fait en déplaçant sa lentille. De même la durée des oscillations d'un balancier dépend à la fois de sa forme, et de la force du spiral qui le fait mouvoir; mais, contrairement à ce qu'on fait pour le pendule, c'est en modifiant la force du spiral, et non en changeant la forme du balancier, qu'on fait varier cette durée. Pour y parvenir, on dispose dans le voisinage de l'extrémité fixe du spiral une pièce A, *fig.* 241, qui présente une échancrure B. Le spiral passe dans cette échancrure, et, lorsqu'il oscille, il ne commence à se déformer qu'à partir du point B; en sorte que la portion BC du spiral est comme si elle n'existait pas, et les choses se passent comme si le spiral se terminait en B.

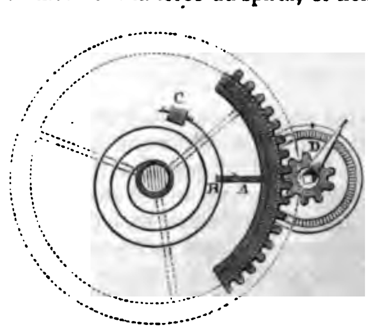


Fig. 241.

Cette pièce A peut se mouvoir circulairement autour de l'axe du balancier; on la déplace en faisant tourner l'aiguille D sur

[redacted]

qui l'accompagne. Quand on fait marcher cette aiguille dans s ou dans l'autre, on produit le même effet que si l'on aug-t ou si l'on diminuait la longueur du spiral, et, par suite, on rier sa force ; on peut donc amener par là le balancier à faire cillations d'une durée déterminée, ou, en d'autres termes, ar ou retarder la montre, de manière à la régler.

variations de température déterminant des dilatations ou des ctions dans les diverses parties d'un pendule ou d'un balan-l en résulte des changements de forme qui font varier la durée scillations, et qui, par conséquent, dérangent la marche de oge ou de la montre. On obvie à cet inconvénient en construi-le pendule ou le balancier de matières inégalement dilatables, nent disposées, que leurs dilatations se contrarient, et qu'il résulte aucun changement dans la durée des oscillations. On nt ainsi des pendules et balanciers *compensateurs :* nous n'en-ns pas dans le détail de leur construction.

475. Toutes les fois qu'une horloge fixe doit être installée dans eu où l'on ne manque pas de place dans le sens vertical, on loie un poids comme moteur de cette horloge. Le régulateur 'ailleurs toujours un pendule.

l'horloge fixe ne doit occuper que très peu de place, comme endules de cheminée, il est impossible de se servir d'un poids ne moteur ; ou bien il faudrait remonter très souvent ce poids, aison du peu d'espace qu'il aurait à parcourir en agissant sur ouages. Dans ce cas on emploie un ressort, sans lui adjoindre fusée, en raison de la bonté du régulateur, qui est toujours endule. Les variations de la force du ressort n'influent pas e manière notable sur la durée des oscillations de ce régu-r.

ressort moteur, et le balancier régulateur muni d'un spiral, exclusivement employés dans les montres : elles ne diffèrent elles que par l'échappement. Dans les anciennes montres, on oyait l'échappement à recul ou à palettes, tel qu'on le voit la *fig.* 230, page 241. Avec cet échappement, il fallait né-irement se servir d'une fusée, pour rendre uniforme l'action essort moteur, malgré les variations de sa force. Dans les res modernes, on a substitué l'échappement à cylindre à l'é-pement à recul, et l'emploi de cet échappement a permis de sser de fusée. En outre on a pu diminuer beaucoup l'épais-de la montre, en raison de la suppression de la fusée et de la de *rencontre. Dans les montres* auxquelles on veut donner *la précision possible, on emploie* l'échappement libre, et l'on

conserve la fusée, afin d'éviter, autant qu'on le peut, tout
de variation dans la durée des oscillations.

§ 176. Lorsqu'on remonte le poids moteur d'une horloge, les
ne rétrogradent pas, ainsi que nous l'avons expliqué précéde
page 248. Mais, pendant toute la durée du remontage, elles
stationnaires, et elles ne recommencent à marcher que lo
remontage est terminé. Il en résulte que, si l'horloge était pr
ment à l'heure, elle se trouve ensuite en retard de tout le tem
dant lequel les aiguilles n'ont pas marché. Lorsque l'horl
marquer le temps d'une manière très précise, comme celles
vent aux observations astronomiques, il est très important
ce retard. On y parvient à l'aide de dispositions qui perm
l'horloge de continuer sa marche, même pendant qu'on la r
Nous allons en indiquer une des plus
qui est très employée.

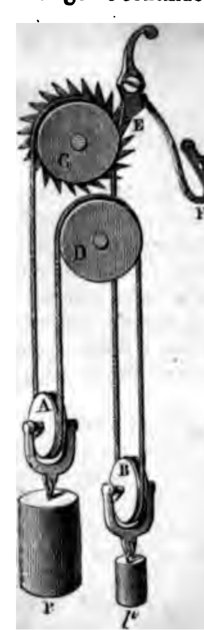
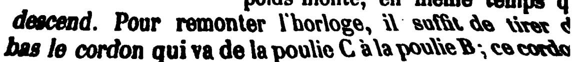


Fig. 242.

Deux poulies mobiles A et B,
sont soutenues par une corde sans
passe dans les gorges de deux poul
C et D. Deux poids P, *p*, sont accroc
deux poulies mobiles. Le plus fort d
P, tend à entraîner la corde ; et co
gorges des poulies C et D sont disp
manière que les cordons qui les en
ne puissent pas y glisser, ces deu
fixes tendent à tourner sous l'a
poids P. La poulie C porte latéralem
roue à rochet, dans les dents de laq
gage un doigt E, pressé constamme
la roue par le ressort F ; et d'aprè
dans lequel les dents du rochet sont
la poulie C ne peut pas céder à l'
poids P. Quant à la poulie D, elle
à la première des roues dentées
posent le mécanisme de l'horloge
du poids P fait tourner cette poul
détermine le mouvement de tous le
Le poids *p* est déstiné à tendre suff
la corde, pour qu'elle ne glisse pa
gorges des deux poulies C et D
poids monte, en même temps q


descend. Pour remonter l'horloge, il suffit de tirer d
bas le cordon qui va de la poulie C à la poulie B ; ce cordo

[redacted]

ns que le doigt E s'y oppose, et le poids P est re-
:r d'agir sur le cordon qui va de la poulie D à la
ie D, étant toujours soumise à l'action du poids
ndant qu'on le remonte, fait tourner les rouages
ıs aucune interruption.
:eur d'une horloge ou d'une montre est un ressort
ent sur les rouages, sans fusée, les choses peuvent
manière que les rouages et les aiguilles s'arrêtent
:age : c'est ce qui a lieu précisément sur la *fig.* 230,
ıvons expliqué dans la page 243. Mais on peut
s, par un simple changement de disposition, faire
ouages et les aiguilles marchent toujours, pendant
sort moteur. Il suffit pour cela que ce ressort soit
rillet fixé à la première des roues du mécanisme,
ıte en faisant tourner l'axe auquel est attaché son
ıre. On voit en effet que, soit qu'on ne touche pas à
soit qu'on le fasse tourner pour enrouler le ressort
ı, l'extrémité extérieure du ressort agira toujours
ce du barillet, et fera conséquemment tourner sans
ue qui y est fixée, ainsi que toutes les autres. C'est
sé le ressort moteur des pendules de cheminée, et
ontres plates, dans lesquelles l'échappement à cy-
e supprimer la fusée. Il est clair que l'axe, auquel
ıché intérieurement, doit porter une roue à rochet,
urner que dans le sens convenable au remontage.
sort moteur agit par l'intermédiaire d'une fusée, le
·tue en faisant tourner la fusée en sens contraire
uel le ressort la fait habituellement tourner. De
chaîne, que l'action du ressort avait entraînée en
tour du barillet, s'enroule de nouveau sur la fusée;
e barillet tourne sous l'action de la chaîne, et en-
: extérieure du ressort, qui se serre ainsi de plus
: son axe. Pour que le mouvement rétrograde, im-
endant le remontage, ne se transmette pas à tous
ui a adapté une roue à rochet, à l'aide de laquelle
remière des roues de la montre, ainsi qu'on le voit
Cette roue à rochet se loge dans l'intérieur de la
n doigt, qui s'y trouve placé, vient s'engager entre
se et la roue dentée ont été écartées l'une de l'autre
afin de bien montrer cette disposition.
ant *comment on parvient à faire continuer le mou-*
ontre, pendant qu'on la remonte, en enroulant la

chaîne sur la fusée. La roue à rochet A, qui fait corps avec la fusée, *fig.* 244, au lieu d'agir directement sur la première roue du rouage, n'agit sur cette roue que par l'intermédiaire d'une seconde roue à rochet B, dont les dents sont tournées en sens contraire. Lorsque le ressort moteur tend la chaîne et fait tourner la fusée, la roue à rochet A, qui en dépend, tourne dans le sens de la flèche *f*: à l'aide du doigt *n*, cette roue fait tourner, dans le même sens, la roue B dont les dents passent ainsi successivement sous le doigt *n*, sans être nullement gênées par ce doigt. Un ressort *abc* est fixé, d'une part en *a* à la roue B, et d'une autre part en *c* à la roue C. La roue B, mise en mouvement comme nous venons de le dire, tire l'extrémité *a* de ce ressort; il se tend, et tire à son tour la roue C, pour la faire tourner dans le même sens. Lorsqu'on fait tourner la fusée, et par suite la roue A, dans le sens de la flèche *f'*, pour remonter la montre, la roue B ne peut pas la suivre, à cause du doigt *n* qui l'en empêche; l'extrémité *a* du ressort *abc* ne pouvant rétrograder, la tension de ce ressort continue à tirer le point *c* de la roue C, dans le sens de la flèche *f*, et la montre ne cesse pas de marcher. Ce ressort peut ainsi entretenir seul le mouvement des rouages et des aiguilles, pendant un temps assez long, pour qu'on puisse remonter complétement la montre; lorsqu'ensuite le ressort moteur reprend son action, il restitue au ressort *abc* la tension qu'il a perdue pendant le remontage.



Fig. 243.



Fig. 244.

§ 177. Pour terminer ce que nous avons à dire de l'horlogerie, nous indiquerons la disposition d'une sonnerie, c'est-à-dire du mécanisme spécial qui fait sonner les heures et les fractions d'heure.

re qu'elles sont marquées sur le cadran par les aiguilles. La 45 représente la sonnerie d'une horloge fixe dont le moteur

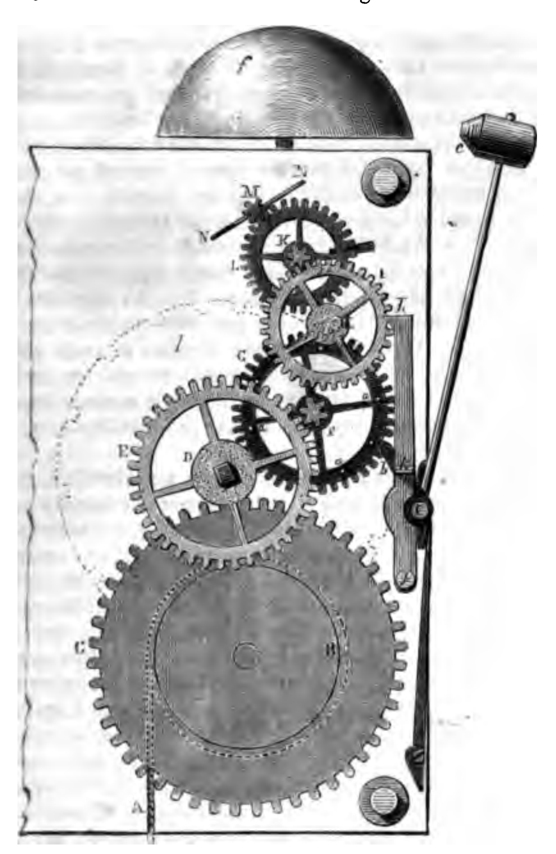


Fig. 245.

poids. Cette sonnerie a un moteur spécial, qui est également ids, attaché à l'extrémité de la corde A. Cette corde s'enroule cylindre B; le mouvement que le poids moteur tend à lui ner *se transmet à la roue C* montée sur le même arbre; la *engrène avec le pignon D,* et fait ainsi tourner une seconde

le levier *b*; ce levier fait tourner l'axe *c*, auquel est au
queue du marteau *e*. Aussitôt qu'une des chevilles *a*, *a*, ab
le levier *b*, après l'avoir soulevé, ce levier revient dans sa
primitive, en vertu de l'action d'un ressort, et le marteau s
ainsi ramené vers le timbre *f*. Si la queue du marteau éta
il ne viendrait pas toucher le timbre. Mais au contraire
flexible et élastique; le marteau peut donc dépasser sa
d'équilibre, en vertu de sa vitesse acquise, et venir c
timbre, pour être ensuite brusquement ramené en ar
l'élasticité de sa queue. On voit par là que le marteau fra
coup sur le timbre, chaque fois qu'une des chevilles *a*, *a*
soulever le levier *b*.

Tant que l'horloge ne doit pas sonner, une cheville *i*,
seule sur le côté de la roue I, vient buter sur l'extrémité
vier *gh*. Ce levier, mobile autour du point *g*, est soule
appendice qui dépend du mécanisme de l'horloge, au mom
où la sonnerie doit commencer à marcher. Si le levier g
tout de suite dans sa position primitive, la roue I est arrêtée
fait un seul tour; une seule cheville *a* est venue agir sur
et le marteau ne frappe qu'un coup sur le timbre. Pour q
teau frappe le nombre de coups qui correspond à l'heur
par les aiguilles, on a fixé au levier *gh* un couteau *k*, q
sur le contour d'une roue *l* placée en arrière. Tout auto

:ie se met en mouvement, doit faire un tour entier dans ouze heures, qui forme la période de temps au bout de nnent des heures de même nom. Pendant ce temps-là, t faire autant de tours que le marteau doit frapper de -à-dire 78 tours, si le marteau ne sonne que les heu- ours si le marteau doit en outre frapper un coup aux , comme dans les pendules de cheminée.

GÉNÉRALES SUR LE TRANSPORT DES FARDEAUX.

ur transporter un corps pesant d'un endroit à un autre, rizontal, on a toujours besoin d'employer une certaine rie beaucoup pour un même corps, suivant les circon- s lesquelles le transport s'effectue. L'emploi de cette lieu au développement d'une certaine quantité de tra- i l'on y réfléchit, on reconnaît sans peine que ce n'est port en lui-même qui nécessite ce travail. On voit, en le corps pouvait glisser ou rouler sur le sol, sans éprou- es résistances passives qui se présentent en pareil cas, lui donner une impulsion, aussi légère qu'on voudrait, mît immédiatement en mouvement; et comme aucune drait à ralentir son mouvement, il conserverait indéfi- ême vitesse. Lorsque ce corps serait arrivé au lieu où e transporter, on l'y arrêterait. Le transport se serait é sans qu'on ait eu à développer d'autre travail moteur i correspond à l'impulsion initiale; et encore ce travail peut être extrêmement petit, pourrait-il toujours don- production d'une quantité égale de travail utile, au l'on arrêterait le corps.

ances passives qui se développent dans le transport esant sur un sol horizontal sont donc les seules résis- ait à vaincre dans ce transport; elles seules nécessi- i d'une force agissant constamment, ou presque con- our que le corps puisse parcourir une distance un peu conçoit par là comment il se fait qu'en variant les ransport, on peut réduire à des proportions si minimes raction qui entretient le mouvement de fardeaux énor- allons passer en revue les divers modes de transport x, en les étudiant surtout sous le point de vue des ré- le chacun d'eux occasionne.

ransport direct par l'homme ou les animaux.— *omme porte un fardeau*, soit dans ses mains, soit sur

son dos, soit de toute autre manière, les résistances passiv développent se réduisent simplement à la résistance que c éprouve de la part de l'air; et comme la vitesse n'est jai grande, cette résistance est, la plupart du temps, néglig force de traction exercée par l'homme, c'est-à-dire la f applique au fardeau, horizontalement et dans le sens du ment, est donc, pour ainsi dire, nulle. Mais l'opération d port est accompagnée d'une tension des muscles qui s soutenir le fardeau, tension qui fatigue l'homme, et qui le fa également, quand même il resterait au repos; en outre les des jambes, qui servent à la locomotion, éprouvent une fa raison du jeu qu'ils prennent. Ces diverses causes réunies le transport direct d'un fardeau par un homme est très qu'il ne peut s'effectuer que pour des fardeaux dont le poid pas trop grand; et enfin qu'on ne doit y avoir recours que petites distances à parcourir, lorsque le poids des fardeau peu considérable.

Le transport à dos d'animaux donne lieu à des observa même genre.

§ 180. **Transport par glissement.** — Lorsque le t d'un corps pesant s'effectue sans qu'il soit porté par un ou p hommes, ou par un animal, ce corps doit s'appuyer su soit directement, soit par l'intermédiaire d'un appareil qui transporter. La pression qu'il exerce en ses points d'app sol donne lieu à des résistances qui s'ajoutent à la résis l'air, pour s'opposer à son mouvement. Si le corps repose ment sur le sol, et qu'on le fasse mouvoir par glisseme développe un frottement qui est souvent très intense. C'e a lieu, par exemple, lorsqu'on transporte de longues pièces en les faisant traîner par des chevaux, à l'aide de chaînes attache à l'une de leurs extrémités. C'est encore ce qui a eu le transport de l'obélisque dont nous avons parlé précéd lorsqu'on l'a fait glisser en Égypte, avant de l'introduire navire, et à Paris, après l'en avoir extrait (§§ 147 et 148

Dans de pareils mouvements, la résistance à vaincre v vant la nature des surfaces qui glissent l'une sur l'autre. minuer la résistance, on fait en sorte que ces surfaces so mées de matières qui glissent facilement; on les polit, enduit quelquefois de matières grasses, qui diminuent la du frottement pour une même pression. Nous en avons vu plo dans le transport de l'obélisque; on l'a fait glisser sur v couvert de madriers qu'on entretenait constamment gr

[redacted]



mploie pour transporter des pièces de vin ou de r des villes, *fig*. 246, sont garnis en dessous de

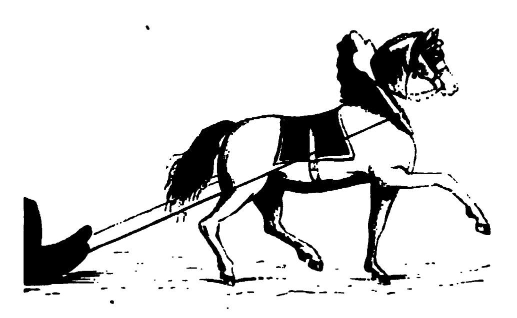


Fig. 246.

i leur permettent de glisser plus facilement sur le , dont on se sert pour patiner sur la glace, ne sont des lames de fer que l'on attache sous ses pieds, ndre presque nulle la résistance qui se développe isse.

port par roulement. — Lorsqu'un corps est a forme, de rouler facilement sur le sol, on en pro- porter; la résistance qu'on a à vaincre dans ce cas beaucoup plus faible que celle qu'on éprouverait ser. Vitruve rapporte que ce moyen fut employé architecte du fameux temple de Diane d'Éphèse, des fûts de colonne qui pesaient 250 000 kilo- effet il leur adapta une monture de bois, destinée une force de traction, comme on le fait pour les se sert en agriculture. C'est de la même manière insporte facilement une pièce de vin à une petite oussant pour la faire rouler devant lui.

ue la forme d'un fardeau se prête à ce mode de on parvient d'une autre manière à remplacer le n roulement. Si le fardeau présente une face plane peu grande, on le fait reposer par cette face sur e bois, *fig*. 247, placés sur le sol, à une certaine l'autre, et dans des directions perpendiculaires à nent *qu'on veut produire*. Lorsque ensuite on tire *e fardeau, il marche*, en faisant rouler les rou-

leaux ; et, si le sol n'est pas trop irrégulier, le déplacem fectue sans qu'il y ait glissement, ni des rouleaux sur le sol, deau sur les



Fig. 247.

Il résulte a été dit à paragraphe la force pour faire ainsi un far d'autant pl que le diam rouleaux petit ; et qu quence, il tageux de prendre des rouleaux d'un aussi grand diam pourra.

Le mode de transport dont nous venons de parler pr grave inconvénient, qui fait qu'on n'y a recours que lorsq tance à parcourir est petite. Il consiste en ce que les ro marchent pas aussi vite que le fardeau. Si l'on examine passe pendant le mouvement, on verra que chaque roul bien sur le sol, dans le sens même du déplacement qu fardeau ; mais il ne touche pas ce fardeau toujours aux mêm il roule sous sa face inférieure, en sens contraire, de ma toucher successivement en des points de plus en plus éloi portion du fardeau qui est en avant. On voit aisément dant que le rouleau fait un tour entier en roulant sur le à-dire pendant qu'il s'avance d'une quantité égale à la de sa circonférence, le fardeau marche d'une quantité ég fois cette longueur ; la vitesse avec laquelle le rouleau sur le sol n'est que la moitié de celle du fardeau. Il qu'après un déplacement de peu d'étendue, l'un des deu est tellement resté en arrière, qu'il ne supporte plus ri donc obligé de le reporter sur la partie antérieure du fa plutôt, pour éviter le mouvement de bascule qui se p moment où le corps commence à ne plus s'appuyer q rouleau, on a soin de disposer en avant un troisième ro se trouve engagé sous le fardeau avant que le rouleau arrière cesse d'agir.

§ 182. **Transport sur des roues.** — Pour faire *l'inconvénient* que nous venons de signaler dans le transp *de rouleaux*, il n'y a qu'à les remplacer par des pièces

roulant sur le sol, restent toujours attachées au fardeau, et le suivent dans son mouvement. C'est ce qu'on fait en employant des roues; et, pour ne pas être obligé de fixer les axes de ces roues aux divers fardeaux qu'on peut avoir à transporter, on se sert de brancards, auxquels les roues sont adaptées, et sur lesquels les fardeaux doivent être placés. Telle est l'origine des voitures de diverses formes, qui servent, comme on le voit tous les jours, à transporter des voyageurs, des marchandises, des matériaux de construction, et en un mot toutes sortes de fardeaux.

Dans le transport sur des roues, il y a à la fois roulement de la roue sur le sol, et glissement de l'essieu dans la boîte de la roue : le frottement n'est donc pas complétement évité, comme dans l'emploi des rouleaux. Mais l'influence de ce frottement est d'autant plus faible que le rapport du diamètre de la roue au diamètre de sa boite est plus grand; car plus ce rapport sera considérable, moins le déplacement du point d'application de la force de frottement sera grand, pour un même chemin parcouru par la voiture, et par conséquent plus le travail résistant occasionné par cette force de frottement sera petit. La grandeur du diamètre de la roue présente encore un autre avantage : c'est que plus ce diamètre est grand, plus doit être petite la force appliquée au brancard, et, par suite, à son centre, pour vaincre la résistance au roulement (fin du § 127).

Le transport sur une brouette, telle que celle qui est figurée à la page 23, tient à la fois du transport direct dont nous avons parlé au § 179, et du transport sur des roues. En effet, le poids de la brouette, et du fardeau qu'elle contient, se décompose en deux parties dont l'une est supportée par la roue, et l'autre par les mains de l'homme qui tient les manches; cet homme a donc, à la fois, à supporter la dernière portion de ce poids, et à pousser la brouette horizontalement, pour vaincre les résistances qu'occasionne la première portion.

Lorsqu'on se sert d'une voiture, munie de deux roues qui tournent autour des extrémités d'un même essieu, le poids du brancard, avec tout ce qu'il porte, se décompose également en deux parties, dont l'une est supportée par les deux roues, et l'autre par l'homme ou l'animal qui doit agir sur les limons. Mais il y a une différence essentielle avec la brouette : c'est qu'on dispose habituellement la charge que doit porter la voiture de manière que son centre de gravité soit à peu près sur le plan vertical qui passe par l'axe de l'essieu. L'homme *ou l'animal* qui doit exercer horizontale-*ment une force de traction pour* faire marcher la voiture n'a de

cette manière qu'à agir faiblement sur les limons, dans le sens vertical, pour maintenir le brancard dans une position convenable.

Quand on emploie une voiture à quatre roues, le brancard et la charge ont toujours leur centre de gravité tellement placé, que la verticale qui le renferme passe à l'intérieur du quadrilatère formé par les points d'appui des quatre roues avec le sol. Aussi n'a-t-on plus besoin d'exercer aucune action dans le sens vertical, pour maintenir le brancard horizontal : il suffit de tirer la voiture, dans le sens du mouvement qu'on veut produire, pour vaincre les résistances occasionnées par le roulement des roues sur le sol, par le glissement des essieux dans les boîtes des roues, et par l'air que la voiture vient rencontrer dans son mouvement.

§ 183. **Stabilité des voitures.** — D'après ce que nous avons dit, on doit donner d'assez grandes dimensions aux roues d'une voiture, pour atténuer autant que possible l'effet des résistances au roulement et au glissement. Il s'ensuit que la charge de la voiture se trouve habituellement élevée d'une quantité assez considérable au-dessus du sol. Cette disposition ôte de la stabilité à la voiture; c'est-à-dire qu'elle est plus exposée à se renverser sur le côté, par suite des inégalités que présente le chemin qu'elle parcourt. Pour que la voiture ne *verse* pas, il faut que la verticale, passant par son centre de gravité G, *fig.* 248, rencontre toujours le sol entre les points par lesquels les roues le touchent. Or on voit que, plus ce centre de gravité sera élevé, moins la voiture devra être penchée sur le côté, pour que la verticale qui le contient sorte des limites qui viennent de lui être assignées.



Fig. 248.

Lorsqu'une voiture est en mouvement sur un chemin incliné transversalement, et qu'en conséquence elle penche vers le côté le plus bas du chemin, la vitesse qu'elle possède influe beaucoup sur sa stabilité. Pendant qu'elle marche, elle penche ordinairement d'une manière irrégulière, tantôt plus, tantôt moins, suivant qu'elle se trouve dans telle ou telle partie du chemin. Pour analyser ce qui se passe en pareil cas, nous pouvons regarder la

[redacted]

re comme animée de deux mouvements bien distincts : le pre- est son mouvement de translation dans le sens de la longueur hemin ; le second est un mouvement de rotation autour de la ente horizontale menée au point A de la roue la plus basse. En u de ce second mouvement, le centre de gravité G décrit un de cercle ayant son centre sur la tangente dont on vient de er ; tantôt il monte, tantôt il descend sur cet arc de cercle. r que la voiture ne verse pas, il faut que le point G ne dépasse ais le point le plus élevé B du cercle ; autrement la pesanteur, agissant sans cesse sur elle, continuerait à la faire tourner au- r de la tangente à la roue au point A, et la ferait ainsi tomber le côté. Au moment où la roue de gauche rencontre une aspérité chemin qui la force à s'élever, le centre de gravité monte sur c de cercle qu'il est obligé de décrire. Si la voiture va lente- nt, la pesanteur maintiendra la roue de gauche en contact avec sol, tant que le centre de gravité n'aura pas dépassé le point B. is si la voiture va vite, les aspérités que la roue de gauche ren- itrera la forceront à s'élever rapidement ; le centre de gravité se uvera, pour ainsi dire, lancé de bas en haut sur son arc de cer- : en vertu de la vitesse de rotation que la voiture recevra ainsi, oue de gauche s'élèvera de manière à ne plus toucher le sol : l pourra arriver que le centre de gravité monte ainsi jusqu'au nt B, la pesanteur n'ayant pas eu le temps de détruire son mou- ient ascendant avant qu'il atteigne ce point. On conçoit par omment il se fait qu'une voiture verse, quand elle marche ra- ement sur un chemin, dont la pente transversale ne l'aurait pas verser, si sa vitesse eût été moins grande.

.es voitures suspendues sont plus susceptibles de verser que es qui ne le sont pas, ainsi que nous allons le faire comprendre lement. Les ressorts de suspension sont destinés à atténuer les ousses que la voiture reçoit à cause des inégalités du chemin. secousses sont éprouvées d'abord par les roues et l'ensemble des es qui sont fixées aux essieux : elles se transmettent ensuite au e de la voiture, par l'intermédiaire des ressorts, qui en amoin- sent l'effet en fléchissant plus ou moins. Lorsque le chemin pré- e des inégalités qui font pencher la voiture de côté et d'autre, 'une quantité plus ou moins grande, le corps de la voiture ne :line pas de même que s'il était fixé aux roues sans l'interpo- n des ressorts. Si une roue est brusquement soulevée par une érité, le corps de la voiture ne cède pas tout de suite à ce mouve- it ; les *ressorts fléchissent*, et il en résulte que la roue qui a *soulevée n'a fait, pour ainsi dire*, que se rapprocher du corps

Il est aisé de conclure de ce qui précède, que les di
ployées sur les routes, pour le transport des voyageur
une très mauvaise disposition, sous le rapport de la st
cumulation des bagages, à leur partie supérieure, fait
de gravité de toute la voiture, lorsqu'elle est chargé
très élevé au-dessus du sol, et les balancements que l
de la route lui transmettent, par l'intermédiaire des r
pas besoin d'être bien grands pour qu'elle verse.

§ 184. **Tirage des voitures.** — La grandeur du tir
dire de la force de traction qui doit être appliquée à une
vaincre les résistances passives qui tendent à ralentir
ment, change beaucoup avec les circonstances dans l
mouvement a lieu. Des expériences ont été faites pou
la valeur de cette force, et les lois des variations qu'
dans les divers cas. Nous allons indiquer les princip
auxquels on est parvenu.

En faisant varier seulement la charge de la voitu
sant marcher toujours sur le même chemin, on a t
tirage était sensiblement proportionnel à la pressio
sur le chemin, c'est-à-dire au poids de la charge a
poids de la voiture elle-même. C'est ce qui devai
puisque les résistances au glissement et au rouleme

[redacted]

ıs avons dit sur la perte de travail occasionnée par les 3).

la manière dont le tirage varie avec la nature du chemin, une idée en examinant le tableau suivant, qui donne le tirage au poids total de la voiture, dans les circonse présentent le plus habituellement, et avec les roues néralement adoptées.

NATURE DU CHEMIN.	RAPPORT du tirage à la charge totale
urel, non battu, argileux, sec.	0.230
urel, non battu, siliceux et crayeux	0,165
me battu et très uni.	0,040
ı sable ou cailloutis nouvellement placés.	0,125
ı empierrement à l'état d'entretien ordinaire	0,080
ı empierrement parfaitement entretenue et roulante.	0,033
avée, voiture suspendue. . { au pas.	0,030
{ au grand trot.	0,070
pont en madriers de chêne non rabotés	0,022
ornières plates de fonte ou de dalles très dures. . . .	0,010
: fer à ornières saillantes, en bon état.	0,007
: fer, id., les essieux étant continuellement graissés. .	0,005

ıau met en évidence le grand avantage que présentent, ıport du tirage, les chemins de fer à ornières saillantes, e les chemins de fer tels qu'on les construit partout. Sur chemins, on peut, avec une même force, traîner une ıucoup plus grande que sur les routes ordinaires, quel ur état d'entretien. Nous donnerons un peu plus loin des leur disposition.

Transport sur un chemin incliné.—Dans le transport au, seul ou avec une voiture, ıemin horizontal, le poids du ; de la voiture, s'il y en a une, ce verticale. Ce poids ne produit directement aucun effet, ni der, ni pour accélérer le mouvement; il n'agit qu'indirectement, en eu à des résistances passives nt proportionnelles, et qui doivent être vaincues par la force de tracen est plus de même, lorsque *est mis en mouvement* sur un chemin incliné. Son

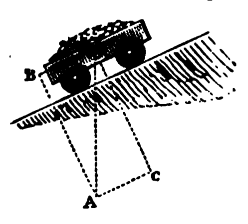


Fig. 249.

poids, qui est toujours une force verticale, appliquée à son c de gravité G, *fig.* 249, peut être décomposé en deux f GB, GC, dont l'une est parallèle au chemin, et l'autre l perpendiculaire. La dernière composante, celle qui est pe diculaire au chemin, ne tend ni à augmenter, ni à dimi vitesse du fardeau; mais c'est elle qui donne lieu au dév ment des résistances au glissement et au roulement, et ces ré tances lui sont proportionnelles. Quant à la première com sante, celle qui est parallèle au chemin, elle agit tout ent et tend soit à augmenter, soit à diminuer la vitesse, suiv qu'elle est dirigée dans le sens du mouvement ou en sens c traire.

Lorsqu'on fait monter le fardeau sur le chemin incliné, la fo de traction qu'on lui applique doit être capable de vaincre, à la f les résistances passives auxquelles le mouvement donne lieu, et l composante du poids du fardeau qui est dirigée parallèlement au chemin. La pression exercée par le fardeau sur le chemin est moins grande que si le chemin était horizontal, puisque cette pression n'est qu'une composante de son poids: l'inclinaison du chemin détermine donc une diminution dans les résistances passives qui résultent de cette pression. Mais si la force de traction, qui doit être appliquée au fardeau, pour le faire monter, éprouve une diminution sous ce rapport, cette diminution est plus que compensée par l'augmentation qu'elle doit recevoir pour vaincre la composante GB, *fig.* 249, du poids du fardeau. En définitive, il faudra une plus grande force pour faire monter le fardeau sur un chemin incliné, que pour le faire mouvoir sur un chemin horizontal, et cette force sera d'autant plus grande que l'inclinaison du chemin sera plus prononcée.

Lorsqu'un fardeau descend le long du chemin incliné, la composante de son poids, qui est parallèle au chemin, agit dans le sens du mouvement. Cette composante fait donc équilibre à une portion des résistances passives, et la force de traction qu'on doit appliquer au fardeau n'a plus à vaincre que l'excédant de ces résistances. Si l'on observe d'ailleurs que la pression exercée sur le chemin est, comme dans les cas précédents, plus faible que si le chemin était horizontal, on verra que l'inclinaison agit de deux manières différentes pour diminuer la force de traction: en rendant les résistances passives plus faibles, et en donnant lieu à une composante du poids, qui fait équilibre à une partie de ces résistances. La diminution qu'éprouve dans ce cas la force de traction est d'autant plus grande que le chemin est plus incliné. Si l'inclinaison est assez

», cette force peut être réduite à zéro: alors la composante ds, dirigée parallèlement au chemin, fait seule équilibre aux nces passives. Si l'inclinaison est encore plus grande, non nent on ne devra pas tirer le fardeau pour entretenir son ment, mais encore il faudra le retenir en lui appliquant une dirigée en sens contraire du mouvement, si l'on veut que son ement ne s'accélère pas indéfiniment. On voit en effet que, ne pareille inclinaison, les résistances passives sont mises en bre par une portion de la composante du poids, qui agit dans ns du mouvement, et l'autre portion de cette composante ienterait sans cesse de la vitesse du corps, si l'on ne s'opposait son action. C'est ainsi que, lorsqu'une voiture descend sur un nin fortement incliné, les chevaux qui sont attelés à la voiture obligés de la retenir, pour empêcher son mouvement de s'ac- rer outre mesure. Il arrive même souvent, lorsqu'il s'agit d'une ure pesamment chargée, et tirée par plusieurs chevaux placés ns devant les autres, qu'on détache les chevaux, à l'exception imonier, pour les attacher derrière la voiture dans les fortes des- tes; ils sont alors en mesure de résister, pour détruire la portion la composante du poids de la voiture, qui n'est pas mise en équi- re par les résistances passives.

Pour faciliter la retenue des voitures dans les descentes, on leur

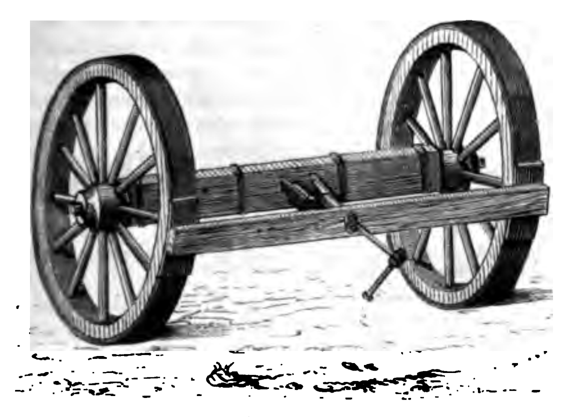


Fig. 250.

nte *ordinairement des freins* à l'aide desquels on peut aug- *er les résistances passives*. Ce sont des plaques de fer, ou des



morceaux de bois qu'on dispose en arrière, tout près des j
roues, à la hauteur de l'essieu, *fig.* 250. On serre le fre
les roues, à l'aide d'une vis placée, soit à l'arrière de la
soit sur le devant: dans ce dernier cas, on transmet l'act
vis au frein par l'intermédiaire de cordes et de leviers div
combinés. La pression du frein contre les jantes des rou
mine un frottement, qui s'ajoute aux autres résistances pas
frottement est plus ou moins fort, suivant que le frein est
moins serré; mais il ne peut pas croître au delà d'une ce
mite. On voit, en effet, que si le frein était trop forteme
son adhérence avec les jantes des roues empêcherait cel
tourner; et les roues glisseraient sur le chemin, comme
avaient été invariablement fixées à leur essieu. Le frottem
tionnel, qui résulte de la pression du frein contre les jantes d
ne peut donc pas devenir plus grand que le frottement d
elles-mêmes sur le chemin, lorsqu'elles ne tournent pas.
que la pression du frein est capable de déterminer un fr
plus considérable, les roues s'arrêtent; ce frottement ne s
pas, et il est remplacé par le frottement des roues sur le

Il y a un inconvénient à serrer le frein contre les rou
fortement pour que celles-ci ne tournent plus; il consiste e
les roues, glissant au lieu de rouler, s'usent d'une manière
en un point de leur contour, et par conséquent ce cont
devenir un peu irrégulier. Pour empêcher cette usure de
duire, dans les cas où l'on peut avoir besoin de remplace
lement d'une roue par un glissement, on se sert d'une piè
qu'on nomme un *sabot*, et qu'on place sous la roue, de m
lui faire supporter toute l'usure qui peut être occasionn
glissement. Pour cela il suffit de mettre le sabot en av
roue, de telle sorte que celle-ci vienne se poser dessus et
Une ch
longueu
nable le
au bra
la voitu
trouve l
moment
s'appuie
lieu de s
périeure

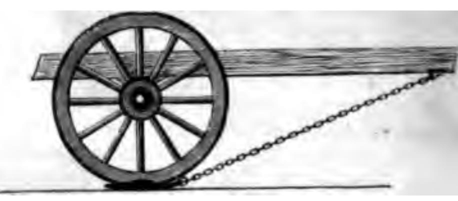


Fig. 251.

La voiture, continuant à s'avancer, entraîne le sabot
porte toujours la roue, et celle-ci ne tourne plus,

[redacted]

ıployer un frein pour l'empêcher de tourner.

Ims de fer.—Nous avons vu, par le tableau de la en là nature du chemin influe sur le tirage des voi- · diminuer ce tirage autant que possible qu'on a mins de fer, sur lesquels, avec une même force de traîner des fardeaux beaucoup plus lourds que sur ires.

construit des chemins à ornières creuses de fonte, ·oulaient des roues amincies vers les bords et pré- ı de lentilles. Mais ces ornières creuses, dont on ır les ornières qui se produisent naturellement sur nt pas tardé à présenter un grave inconvénient : il es ordures de toutes sortes, qui nuisaient beaucoup oulage, et qui faisaient ainsi disparaître une grande ages qu'on en attendait. Ces chemins à ornières ; existent encore en Angleterre dans des mines, et 'ace de la terre, dans le voisinage de ces mines : ıstruit plus aucun, à cause de l'inconvénient qui alé.

e fer à ornières saillantes sont généralement adop- Les ornières saillantes, ou *rails*, sont de fer forgé : barres, amincies vers le milieu de leur largeur, et hamp, au bout les unes des autres. Des traverses ɔsées de distance en distance, dans un sens perpen- ection du chemin ; chacune de ces traverses porte

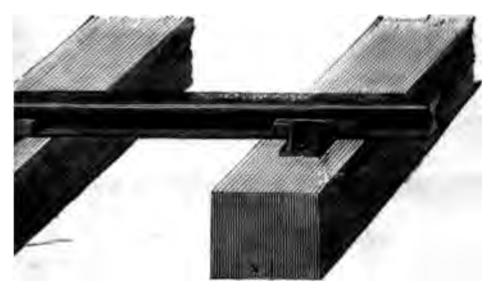


Fig. 252.

le fonte, qui sont solidement fixés sur sa surface ; les uits dans l'*ouverture des coussinets*, et y sont assu- *coins de bois qu'on* y enfonce avec force, fig. 252.



Les roues des voitures ou *wagons*, qui circulent sur ces ne pourraient se maintenir sur la face supérieure des rails jante ne présentait un rebord, ou *boudin*, disposé vers l' de la voie, *fig*. 253. Les boudins des deux roues qui corre à un même essieu, descendent entre les deux rails, un peu sous de leur face supérieure, et empêchent ainsi les deux sortir de la voie, ou comme on dit, de dérailler.

Lorsque les roues tendent à s'écarter de la voie, d'un c l'autre, les boudins s'y opposent, en venant s'appuyer face intérieure de l'un des rails; il en résulte un frottem boudins contre le rail, et cela augmente le tirage. C'est p ce frottement, qu'on donne aux jantes des roues une form ment conique, comme le montre la *fig*. 253. On incline peu les rails vers l'intérieur de la voie, et on leur donne u ment un peu plus grand que la distance qui existe entre

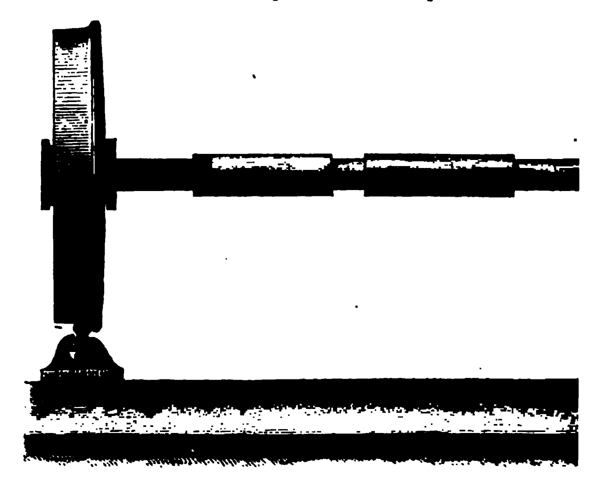


Fig. 253.

extérieurs des boudins de deux roues correspondantes. manière la pesanteur, en agissant sur les wagons, fait les jantes des roues sur les deux rails, autant que le pe écartement, et maintient les deux boudins à une petit des faces intérieures des rails. Si, par une cause quelcon des boudins vient à toucher le rail correspondant, il le c

renir à la position que la pesanteur tend constamment

les boudins remplissent toujours bien leur objet, et que aient une stabilité suffisante sur les rails, tout en se c une grande rapidité, il est indispensable que les roues ient bien verticales, c'est-à-dire qu'elles ne penchent érieur ni vers l'extérieur de la voie. Pour assurer cette ne dispose pas les roues de la même manière que dans ordinaires. Au lieu de fixer chaque essieu à la voiture, tourner les roues autour de ses deux extrémités, on fixe l'essieu, et on le rend mobile avec elles; il tourne dans ets adaptés à la partie inférieure du wagon.

des roues aux essieux entraîne une conséquence que s signaler. D'après cette disposition, les deux roues qui es aux deux extrémités d'un même essieu, doivent tour-le: elles font nécessairement un même nombre de tours mps donné. Cela ne gêne en rien le mouvement, quand r une voie droite; mais il n'en est pas de même quand courbe. Dans une voie courbe, le rail extérieur, c'est-à-qui est placé du côté de la convexité de la voie, est plus rail intérieur; si les deux roues étaient libres de tourner nment l'une de l'autre, celle qui repose sur le rail exté-it plus de chemin à parcourir que celle qui repose sur ieur, ferait plus de tours que cette dernière, dans le s. Lorsqu'au contraire elles sont fixées à l'essieu, elles es de s'accorder constamment dans leur mouvement. Si repose sur le rail intérieur roule de la même manière tait seule, elle oblige l'autre roue à ne pas tourner au-le ferait sans sa liaison avec la première: et il en ré-ette autre roue doit glisser sur son rail, d'une quantité lifférence entre les longueurs des deux rails. Si ce n'est extérieure qui glisse, ce sera la roue intérieure; ou bien ont chacune d'une certaine quantité, l'une dans un sens, ens contraire. Quoi qu'il en soit, le roulement de deux s, fixées sur un essieu, ne peut s'effectuer sur une voie s qu'il se produise un glissement; ce glissement déter-ttement, qui augmente d'autant le tirage. Si l'on veut ver tous les avantages que présente un chemin de fer, ort de la petitesse du tirage qu'il nécessite, en maintenant xes aux extrémités de leurs essieux, il faut éviter de hemin des courbures trop prononcées: on devra le for-s *droites, raccordées par* des courbes d'un grand rayon.

Lorsqu'un wagon marche rapidement dans une partie courbe la voie qu'il parcourt, son mouvement donne lieu au développement d'une force centrifuge très sensible, dirigée horizontalement perpendiculairement à la voie, et du côté de la convexité de la courbe. Cette force centrifuge tend à faire sortir le wagon de la voie, et il en résulte que les boudins des roues qui se trouvent du côté de cette convexité viennent frotter contre le rail extérieur. Pour éviter ce frottement, on dispose le rail extérieur un peu plus haut que l'autre, dans toute la longueur de la partie courbe; en sorte que, quand un wagon se trouve dans cette partie du chemin, il est comme sur un plan incliné transversalement. La différence de niveau des deux rails a été déterminée de telle manière, que la résultante du poids du wagon, et de la force centrifuge qui se développe lorsqu'il est animé de la vitesse ordinaire, soit dirigée perpendiculairement au plan qui passe sur les faces supérieures des deux rails. Par cette disposition, les deux boudins sont maintenus chacun à une certaine distance du rail dont il est voisin, tout aussi bien que lorsque le wagon marche sur une voie droite, et que les deux rails sont placés au même niveau.

Nous verrons bientôt que l'emploi des machines à vapeur locomotives, pour faire mouvoir les convois de wagons sur les chemins de fer, exige que ces chemins ne présentent pas de trop fortes pentes. D'ailleurs, les pentes un peu fortes feraient disparaître les grands avantages qu'on trouve dans l'emploi des chemins de fer. Aussi les construit-on horizontalement, ou presque horizontalement, et ce n'est que dans des circonstances exceptionnelles qu'on y introduit des pentes prononcées. Il résulte de là que l'on est obligé de faire des déblais et des remblais, suivant que la surface du sol s'élève au-dessus du niveau qu'on veut donner à la voie, ou s'abaisse au-dessous de ce niveau : et lorsque ces différences de niveau sont trop fortes, on construit des *tunnels* et des *viaducs*.

§ 187. Il serait d'une très grande importance qu'on pût introduire des courbes de petit rayon dans le tracé des chemins de fer; cela permettrait de se détourner, pour éviter de traverser des montagnes ou des vallées, et pour se maintenir toujours à peu de distance de la surface du sol : de cette manière, les travaux de construction du chemin seraient beaucoup simplifiés, et il en résulterait une grande économie. Divers moyens ont été proposés pour atteindre ce but ; nous n'en indiquerons qu'un seul, celui qui a été imaginé par M. Arnoux, et qui a reçu son application sur le chemin de fer de Paris à Sceaux.

Nous avons vu que c'était surtout la fixité des roues aux essieux qui faisait exclure les courbes de petit rayon, à cause du frottement qui se développe nécessairement dans le parcours de pareilles courbes, en raison de la différence de longueur des deux rails. M. Arnoux a d'abord rendu aux roues leur mobilité autour des extrémités des essieux ; en sorte que les roues d'un même essieu tournent indépendamment l'une de l'autre, et chacune d'elles peut tourner de la quantité convenable, d'après la longueur du chemin qu'elle parcourt, pour ne pas glisser sur le rail.

Mais cela ne suffit pas. Pour que le roulement des roues s'effectue convenablement, et que leurs boudins ne frottent pas contre les bords des rails, il faut que le plan de chaque roue passe, à chaque instant, par la tangente au rail menée au point où cette roue le touche. Il faut donc que l'essieu de cette roue soit dirigé perpendiculairement au rail, c'est-à-dire à la voie. Il en résulte que les deux essieux d'un même wagon ne doivent pas rester parallèles, lorsque le wagon s'engage dans une partie courbe du chemin : ils doivent être dirigés suivant deux rayons du cercle dont cette courbe est une portion, et par conséquent, ils doivent converger vers le centre de ce cercle. En conséquence M. Arnoux a rendu tous les essieux mobiles autour de chevilles ouvrières, comme le sont les essieux de devant des voitures ordinaires à quatre roues, et il a adopté les dispositions suivantes, pour que chaque essieu, tournant autour de sa cheville ouvrière, se place toujours perpendiculairement à la direction de la voie.

Le premier essieu AA d'un convoi, *fig.* 254, qu'il appartienne à une locomotive ou à un wagon, peu importe, est dirigé par de petites roues ou galets B, B, au nombre de quatre, dont les axes sont portés par des chapes fixées à l'essieu lui-même. Ces galets s'appuient sur le côté intérieur de chacun des deux rails, et les boudins dont ils sont garnis s'engagent sous les rebords de ces rails, comme le montre la *fig.* 255. D'après cette disposition, dans quelque sens que la voie tourne, les galets B, B amènent toujours l'essieu AA à être perpendiculaire à sa direction. Le dernier essieu du convoi est dirigé exactement de la même manière.

Voici maintenant en quoi consiste le moyen qui est employé pour diriger tous les essieux intermédiaires. Les wagons, au lieu d'être attachés les uns aux autres par des chaînes à ressorts, comme sur les chemins de fer ordinaires, sont réunis par des barres rigides, ou *timons*, aboutissant aux chevilles ouvrières, autour desquelles ces barres peuvent tourner librement. Ainsi, à la suite de la flèche CC, qui réunit les deux chevilles ouvrières du premier

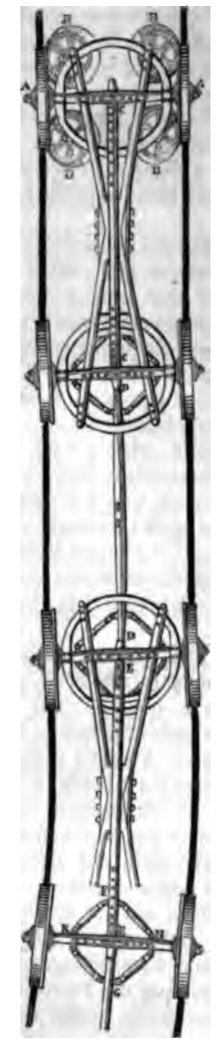


Fig. 254.

wagon, *fig.* 254, se trouve un ti
reliant la seconde cheville ouvr
premier wagon à la première du
wagon ; de même, à la suite de l
EE du second wagon, se trouve

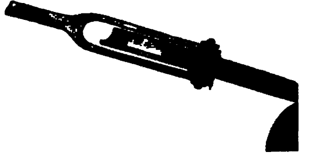


Fig. 255.

mon EG servant à relier le second
au troisième, et ainsi de suite. I
de cette disposition que les flèch
timons, dont les longueurs sont les
forment un polygone à côtés égau
pour sommets les diverses chev
vrières ; et puisque ces sommets
vent toujours sur la ligne courbe q
comme l'axe de la voie de fer, le p
dont il s'agit est inscrit dans ce
courbe. On comprend dès lors q
amener chaque essieu à être di
pendiculairement à la voie, il
l'obliger à faire toujours des angl
avec la flèche et le timon qui ab
à son milieu. On y parvient au m
quatre barres de même longueu
lées, d'une part en F et G à la
au timon, et d'une autre part e
à deux manchons qui enveloppen
et qui peuvent l'un et l'autre glis
certaine quantité dans le sens d
gueur Le losange FHGK, dont
tre barres sont les côtés, est d
ceptible de se déformer ; et il se
en effet lorsque la flèche et le ti
portent les sommets F, G, vi
changer de direction l'un par r
l'autre. Alors les manchons H, K

long de l'essieu, et le font mouvoir en même temps autour de la cheville ouvrière, de manière à le placer toujours suivant la diagonale HK du losange. On conçoit d'après cela que, quel que soit l'angle de la flèche avec le timon, l'essieu sera toujours également incliné sur chacun d'eux, et que par conséquent il ne cessera pas d'être dirigé perpendiculairement à la voie.

Cette dernière disposition, relative aux essieux intermédiaires, n'est pas celle que M. Arnoux avait imaginée tout d'abord, et qu'il a appliquée à la construction des wagons de chemin de fer de Paris à Sceaux. Par sa simplicité, elle est de beaucoup préférable à la disposition primitive, que nous ne décrirons pas. L'idée de cette amélioration lui a été suggérée par un de ses fils.

Un convoi d'une longueur quelconque, dont les wagons sont construits d'après le système de M. Arnoux, peut s'engager dans des parties courbes ou sinueuses d'un chemin de fer, où la courbure de la voie peut changer assez rapidement, sans que les essieux cessent d'être perpendiculaires à la voie. La facilité avec laquelle le convoi se replie suivant tous les contours du chemin fait qu'on désigne souvent le système de M. Arnoux sous le nom de *système de wagons articulés*.

§ 188. Il arrive souvent qu'une voie de fer se bifurque, c'est-à-dire qu'elle donne naissance à deux voies distinctes, qui s'écartent l'une de l'autre, et dont chacune peut être regardée comme le prolongement de la première. Lorsqu'un convoi de wagons marche de la voie unique vers cette double voie, il faut qu'on puisse le faire entrer à volonté sur l'une ou sur l'autre des deux nouvelles voies. On y parvient à l'aide des *aiguilles*, dont nous allons donner la description, et qui sont représentées par la *fig.* 256.

Cette figure est disposée de manière qu'un convoi, arrivant par la partie inférieure, suivra les rails AA, BB. Les rails A' et B' forment le commencement de la seconde voie, dans laquelle le convoi ne peut nullement s'engager. Deux bouts de rails CD, EF, qui sont amincis à leurs extrémités D, F, peuvent tourner autour de leurs autres extrémités C, E; c'est ce que l'on nomme les aiguilles. Une tige de fer G, attachée à l'aiguille EF, est destinée à tirer cette aiguille, de manière à appliquer son extrémité F contre le rail BB, en la faisant tourner autour du point E; en même temps une seconde tige de fer H, attachée à l'aiguille EF, entraîne l'autre aiguille CD, pour la détacher du rail contre lequel elle est appuyée. Alors le convoi, arrivant toujours par la partie inférieure de la figure, ne suit plus la même voie que tout à l'heure, et s'engage sur les rails A' et B'. Il suffit donc de tirer la tige de fer G, ou de la pousser, dans le sens de sa longueur, pour que le convoi s'avance sur l'une ou l'autre

des deux nouvelles voies qui font suite à celle par laquelle il est arrivé. Le contre-rail K est destiné à prévenir le déraillement, au moment où les roues des wagons viennent passer sur les aiguilles.

On agit sur la tige de fer G, à l'aide du levier LNM, *fig.* 257, dont le point fixe est en M. En relevant l'extrémité L de ce levier, on tire la tige de fer G, qui est articulée en N ; en la rabaissant ensuite, pour lui rendre la position qu'indique la *fig.* 257, les aiguilles reprennent leur position primitive, c'est-à-dire celle que montre la *fig.* 256. La masse de fonte qui est adaptée au levier, tout près de la poignée L qui le termine, est destinée à maintenir les aiguilles dans

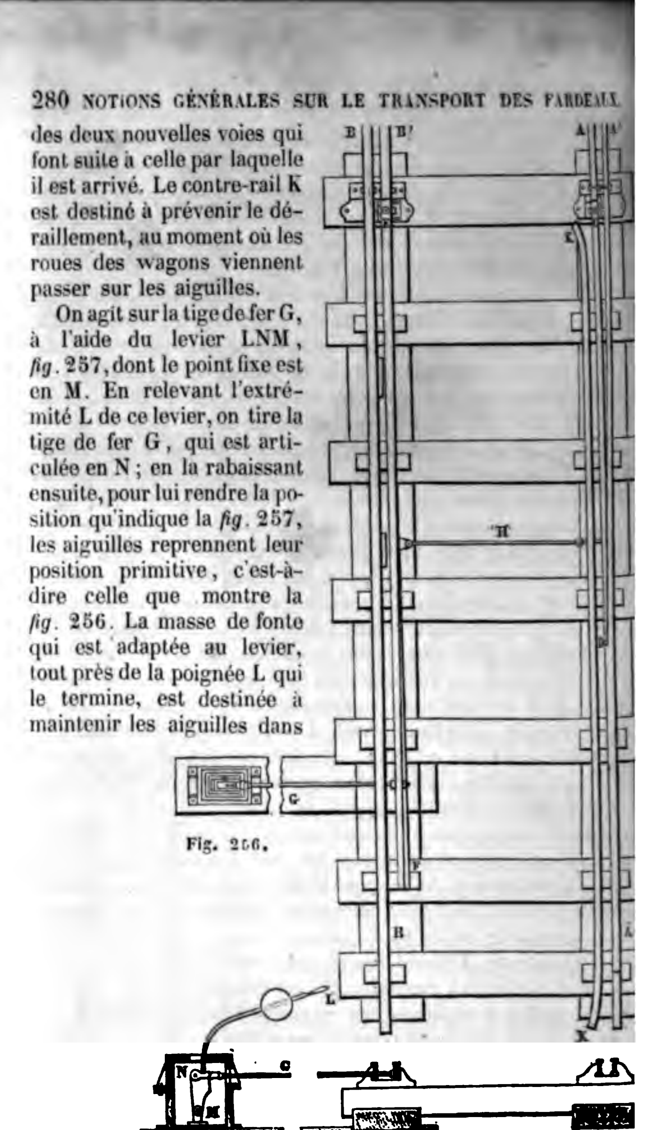


Fig. 256.

Fig. 257.

ion, sans qu'on ait besoin de s'en occuper; on ne doit agir
er, et par suite sur les aiguil-
ns les circonstances acciden-
'on veut que le convoi passe
ils A', B'.

deux voies parallèles exis-
é l'une de l'autre, et qu'on
besoin de faire passer les
e l'une à l'autre, on les
une troisième voie qui vient
der avec chacune d'elles,
On dispose, aux deux points
lement, des aiguilles à l'aide
on peut engager les convois
voie accessoire, pour les
r de l'une des deux voies
s sur l'autre. D'ailleurs les
ui servent à manœuvrer ces
sont munis de contre-poids,
aintiennent dans une position
les deux voies principales
ns les mêmes conditions que
accessoire n'existait pas.

Dans les gares, on a besoin
e faire passer des wagons
sur une autre, et l'on ne
disposer de tout l'espace que
une voie de raccordement,
celle que nous venons d'in-
lors on se sert de plaques
s. La *fig.* 259 représente
es plaques, toute de fonte,
sur sa surface deux portions
le fer, dirigées à angle droit
l'autre. Cette plaque est
en un point d'une voie prin-
telle manière, qu'une des
tions de voie qu'elle porte
ie de cette voie prin-
ne voie accessoire,
ulaire à la première,
le avec la seconde por-

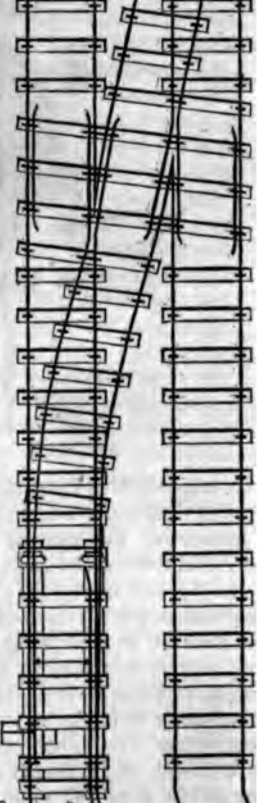


Fig. 258.

tion de voie que porte la plaque. Lorsqu'un wagon, circulant
voie principale, a été amené sur la plaque, on la fait tourn
angle droit, autour d'un axe vertical qui passe par son centre;
il suffit de faire marcher le wagon, pour qu'il s'engage

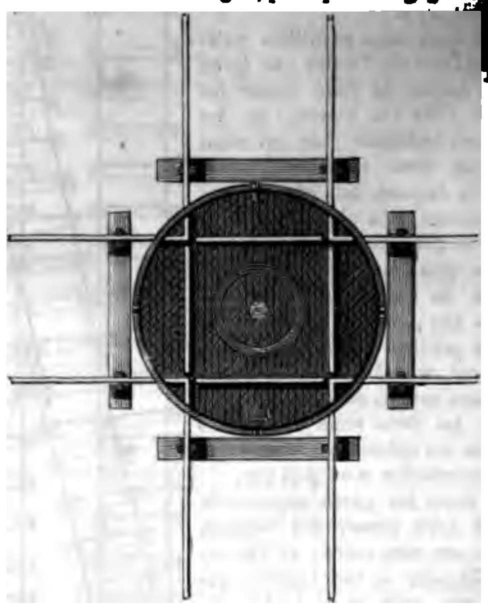


Fig. 259.

voie transversale. On peut ainsi conduire ce wagon dans parties de la gare, auxquelles aboutit la voie accessoire; l'amener sur une seconde plaque tournante, à l'aide de on l'installera sur une seconde voie principale parallèle à la p

La *fig*. 260 montre les galets qu'on place au-dessous des tournantes, pour les soutenir, et s'opposer aux frottement dérables qui se produiraient sans leur présence, pendant rait tourner ces plaques avec la charge qu'elles support galets, en forme de troncs de cône, sont adaptés à une mo dépendante de la plaque, et formée de tiges de fer qui ra tout autour d'un collier central; la plaque les entraîne mouvement, en les faisant rouler : mais ils ne marchent p *vite qu'elle*, et ne font qu'un tour autour de son axe, pendar

ls se comportent comme les rouleaux dont nous avons
§ 181.

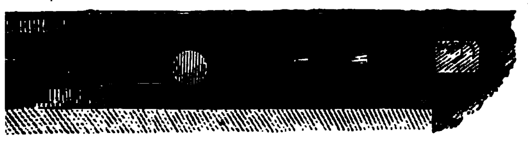


Fig. 260.

mploie généralement comme moteurs, pour faire mou-
s sur les chemins de fer, des machines à vapeur loco-
l'on nomme par abréviation des *locomotives*. Nous
ard quelle est la disposition de ces machines ; pour le
devons nous contenter de savoir qu'une locomotive
ne à vapeur montée sur des roues, et que l'action de
xclusivement employée à faire tourner un des essieux
lent à ces roues. Une locomotive est ordinairement
six roues, et a par conséquent trois essieux. C'est
ilieu qui reçoit un mouvement de rotation de la ma-
oues qui sont fixées à ses deux extrémités participent
nt ; quant aux quatre autres roues, elles servent sim-
ıtenir la machine, et à la maintenir sur la voie de fer,
le est en mouvement.
qu'une locomotive, placée sur une voie de fer, y soit
s obstacles qui l'empêchent d'avancer. Lorsqu'on fera
, l'essieu du milieu tournera, avec les deux roues qui
et que l'on nomme les *roues motrices ;* ces roues glis-
rails, et il en résultera un frottement d'autant plus
ression qu'elles exercent sur les rails sera plus forte.
re était libre d'avancer, ce frottement ne se produirait
s motrices rouleraient au lieu de glisser, et entraîne-
es toute la machine. Pour que la locomotive reste im-
donc qu'elle soit soumise à une force résistante égale
que cette immobilité détermine. Une résistance infé-
ttement, étant appliquée à la locomotive, ne suffira pas
et sera par conséquent vaincue par elle. Il résulte de là
tive est capable d'exercer une force de traction égale à
ement que ses roues motrices exerceraient sur les rails,
on l'empêcherait d'avancer ; et toutes les fois qu'elle
ête d'un convoi de wagons, pour lequel cette force
ra *suffisante*, elle l'entraînera dans son mouvement.

La puissance d'une locomotive dépend donc essentiellem pression que ses roues motrices exercent sur le chemin. Il qu'il faut que la machine soit disposée de manière que l puisse y développer toute la force nécessaire à la tracti locomotive doit exercer ; mais cette force ne peut se transm convoi que par l'adhérence des roues motrices avec les rail chine à vapeur pourrait avoir une très grande force, et s pable d'exercer qu'une médiocre traction, si les roues n'exerçaient qu'une faible pression sur les rails.

Nous avons vu (§ 43) que, lorsqu'un corps pesant s'ap un plan horizontal par plus de trois points, les pressions qu en ses divers points d'appui ne dépendent pas seulement poids et de la place qu'occupe son centre de gravité par r ces points : ces pressions dépendent aussi de la flexibilité moins grande des diverses parties du corps, ainsi que du lequel il s'appuie. C'est ce qui arrive pour une locomotive, six roues supportent toute la machine par l'intermédiaire de de suspension ; la pression exercée par une de ces roues s est d'autant plus grande, que le ressort qui lui correspond fort. Aussi donne-t-on une grande force aux ressorts des de motrices, afin de leur faire supporter à elles deux une gra tion du poids total de la locomotive. D'un autre côté, on la machine de manière qu'elle ait un poids considérabl arrive ainsi à déterminer une grande adhérence des ro trices sur les rails, c'est-à-dire à permettre à la locomotive une grande force de traction. On peut évaluer à environ 2 logrammes le poids d'une locomotive, telle qu'on les constr tenant.

Pour augmenter la puissance de traction d'une locomotiv souvent les roues motrices à deux des quatre autres roues, à toutes les quatre. à l'aide de bielles qui sont articulées rayons de ces roues, *fig.* 261. Les roues, ainsi réunies par c prennent le nom de *roues couplées*. A l'aide de cette dispo roues motrices ne peuvent pas tourner, sans faire tourner temps celles auxquelles elles sont liées ; et ce n'est plus l'adhérence des roues motrices sur les rails qui détermin que la force de traction ne peut pas dépasser ; mais c'est l'a de ces roues et de celles qu'elles entraînent nécessairement mouvement. Il est aisé de reconnaître que des roues ne peu couplées qu'autant qu'elles ont le même diamètre, puisqu' vent faire le même nombre de tours dans un même inte *temps*.

ues d'une locomotive sont couplées, et que son poids
logrammes, on pourra compter qu'elle sera capable

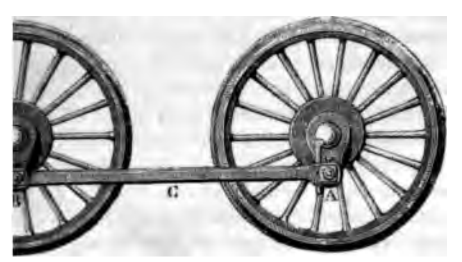


Fig. 261.

rce de traction de 2 500 kilogrammes; car le rap-
nt à la pression, dans le glissement de fer sur fer,
scendre au-dessous de 0,1. En admettant donc que
ppliquée à un convoi de wagons, dont les essieux
ement graissés, et pour lequels le tirage ne soit que
r poids (§ 184), on voit que la locomotive sera ca-
, sur un chemin de fer horizontal, un convoi pesant
nmes.

iemins de fer sont rarement horizontaux dans une
; ils sont formés ordinairement d'une suite de par-
séparées par des parties inclinées, les unes dans
es en sens contraire. Les convois ont donc souvent
entes; aussi les locomotives ne peuvent-elles pas
si énormes que celui que nous venons de trouver,
on de la pesanteur qui, dans les montées, absorbe
. force de traction qu'elles sont capables d'exercer.
nps que le tirage d'un convoi augmente, lorsqu'il
ie horizontale du chemin sur une partie montante,
ion que la locomotive peut exercer diminue. En
nin incliné, son poids se décompose en deux forces,
·allèle au chemin, et l'autre lui est perpendiculaire.
roues motrices sur les rails est déterminée par cette
ante seule, et est, par conséquent, plus faible que
1 est horizontal; et, en outre, lorsque la locomotive
on de cette adhérence est employée à vaincre l'autre
son poids. Aussi la puissance de traction d'une lo-
e-t-elle assez rapidement, à mesure que l'incli-

sur une voie de fer inclinée, et que l'action de la pesant
fasse pas descendre, en faisant glisser ses roues sur les
peut être certain qu'elle montera, lorsque ses roues, rendu
les, seront mises en mouvement dans un sens convenable,
tion de la vapeur. Or, pour que la locomotive, avec ses ro
ne glisse pas sur ce plan incliné, sous l'action de la pesante
que le rapport de la hauteur du plan incliné à sa base (§ 6
pas plus grand que le rapport du frottement à la pressio
glissement de fer sur fer. Si le premier rapport est égal a
la locomotive pourra monter, mais elle ne sera capable
aucune force de traction sur d'autres corps ; si le premie
est plus petit que le second, elle pourra exercer une forc
tion d'autant plus grande que la différence entre ces deu
sera elle-même plus grande.

La partie du chemin de fer de Paris à Saint-Germain, q
cette dernière ville, présente une rampe dont l'inclinai
$0^m,035$ par mètre, et qui a été construite pour conduire
geurs presque au niveau du sol de la ville, à l'aide d
atmosphérique dont nous parlerons plus tard. Les conv
pas remorqués sur cette rampe par des locomotives ; cepe
peuvent les remonter encore avec une assez forte charg

§ 192. Un des grands avantages des chemins de f

[redacted]

›idité supérieure à une certaine limite, il suffirait d'aug- .iamètre de ces roues, pour que la rapidité du mouve- nvoi pût devenir aussi grande qu'on voudrait, puisque, e tour de l'essieu, le convoi avance d'une quantité égale ›ur de la circonférence des roues motrices. La vitesse le les convois circulent sur les chemins de fer, en France, ı 40 kilomètres par heure; en y comprenant les temps stations, on doit compter sur une vitesse moyenne d'en- :ilomètres par heure.

Pour arrêter les convois en mouvement, on arrête l'action ır, et l'on se sert de freins, à l'aide desquels on augmente ınces passives. Ces freins sont disposés autrement que ›itures ordinaires, mais ils agissent d'une manière analo- erçant un frottement sur le contour des roues. Ce sont ıent deux morceaux de bois, placés entre deux roues d'un ɜon, *fig* 262, et taillés de manière à embrasser une por-

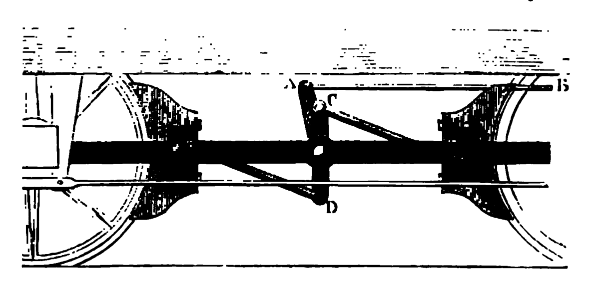


Fig. 262.

›ntour de chacune de ces roues. Une tringle AB est dispo- anière à agir sur le levier CD, mobile autour de l'axe E. ɜ AB est articulée, en A, à un bras de levier fixé à cet axe; nt cette tringle de A vers B, on appuie les deux morceaux ontre les roues, par l'intermédiaire de tiges de fer qui sont ı d'une part aux deux extrémités du levier CD, et d'une ·t à ces deux morceaux de bois.

nre de frein, qui est généralement adopté, offre le même ient que le frein des voitures ordinaires. Lorsqu'on le serre tement pour empêcher les roues de tourner, elles glissent ıils, s'usent en un seul *point* de leur contour, et deviennent *·es. Pour obvier à cet inconvénient*, M. Laignel a propose

Fig. 263.

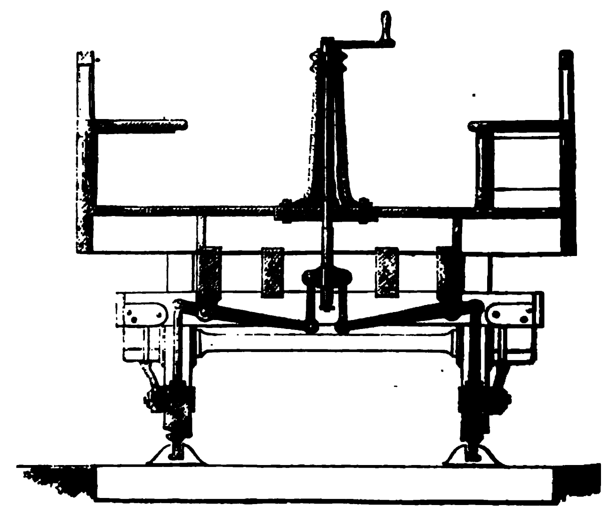


Fig. 264.

le frein ordinaire par celui que représentent les
. Ce frein consiste en deux espèces de patins, qui sont
ıx côtés d'un wagon, entre les roues qui les suppor-
tient habituellement suspendus entre ces roues, au-
.ls, sans qu'ils les touchent en aucune manière Lors-
ire agir le frein, on fait tourner une manivelle qui
une vis : l'écrou, qui est engagé dans cette vis, s'élève,
en même temps les deux patins, par l'intermédiaire de
fig. 264. Ces patins viennent alors s'appuyer sur les
ıt plus fortement qu'on a fait tourner davantage la ma-
en résulte un frottement qui tend à ralentir la marche
.e frottement qui se développe ainsi peut devenir pres-
ense que celui qui se produit lorsqu'on empêche les
rner, à l'aide du frein ordinaire ; il suffit pour cela d'a-
eux patins, de manière à leur faire supporter presque
du wagon. Les patins sont munis inférieurement d'une
fer, qui présente un rebord analogue aux boudins des
éviter le déraillement au moment où l'on manœuvre le
les roues ne s'appuient presque plus sur les rails. Ce
Laignel a été employé avec avantage sur plusieurs
fer, et notamment sur les plans inclinés de Liége.
ı résistance qui s'oppose au roulement des wagons sur
le fer est une si petite fraction de leur poids, que l'in-
chemin n'a pas besoin d'être bien grande, pour qu'ils
cendre le long de ce chemin sous la seule action de leur
it, en effet, qu'il suffit pour cela que la composante du
e parallèlement au chemin, soit capable de vaincre les
›assives qui s'opposent au mouvement (§ 185). Aussi,
are de trouver, sur les chemins de fer, des endroits où
ıs être bien forte, est assez prononcée pour que le mou-
convois puisse se continuer sans qu'on fasse agir la
'on est même quelquefois obligé, en pareil cas, de se
eins, pour empêcher la vitesse de devenir trop grande.
, comme un exemple remarquable, la portion du chemin
.nt-Étienne à Lyon, qui est comprise entre la première
rs ; les wagons parcourent toute cette portion du che-
ı longueur est de plus de 36 kilomètres, en vertu de la
de la pesanteur, et par conséquent sans qu'on ait besoin
es locomotives en tête des convois. La pente est de
mètre de Saint-Étienne à Rive-de-Gier, et seulement
par mètre de Rive-de-Gier à Givors. Pendant ce par-
sert constamment des freins pour modérer la vitesse des



descente des wagons chargés pour remonter les wagons v
cela, on attache deux wagons aux deux extrémités d'une
l'on fait passer dans la gorge d'une grande poulie h
installée au haut du plan incliné, *fig*. 265 et 266. Les de
de cette corde, en quittant la poulie, se dirigent suivant
de deux voies de fer parallèles, sur lesquelles doivent s
les deux wagons. La pesanteur, en agissant sur les deu
tend à faire descendre chacun d'eux le long de la voie i
laquelle il est posé : mais la corde qui les réunit s'oppose
en soit ainsi. Décomposons les poids des deux wagons, co
l'avons déjà fait plusieurs fois, en leurs composantes pa
perpendiculaires au chemin. Les premières, celles qui s
lèles au chemin, agissent aux deux extrémités de la co
sont ces forces qu'il faut considérer, pour savoir s'il y a
libre ou mouvement, et, dans ce dernier cas, quel sera
mouvement. Si les wagons étaient également pesants,
seraient égales, et la corde resterait immobile. Mais, s
wagons est chargé et l'autre vide, la composante du poi
mier l'emportera sur celle du poids du second ; le wag
descendra et fera remonter le wagon vide.

Le mouvement ainsi produit est tout à fait analogue à
nous avons observé dans la machine d'Atwood (§ 84) ;
augmenterait donc constamment, si l'on n'avait soin de l

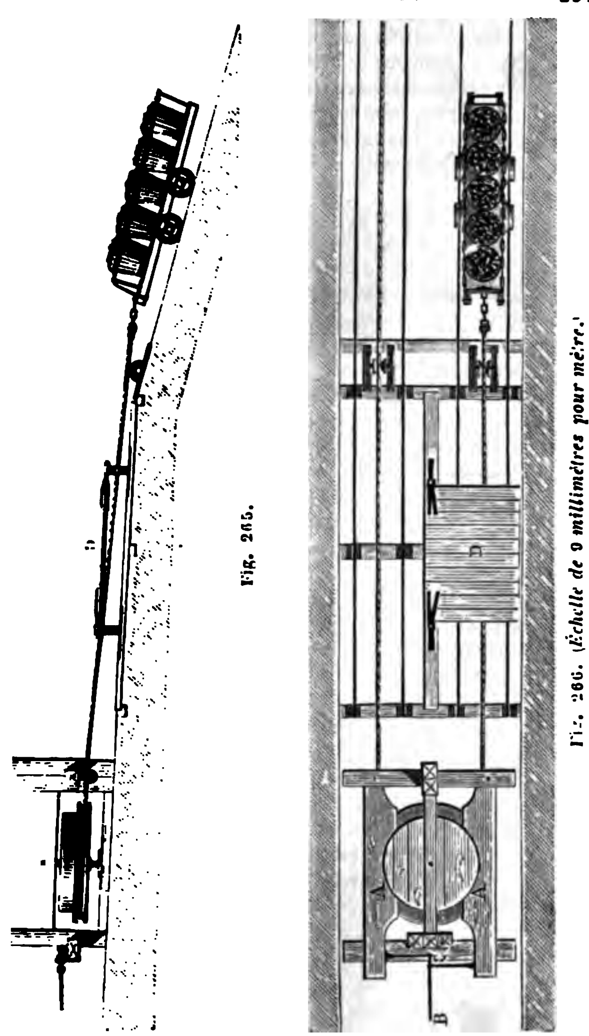


Fig. 265.

Fig. 266. (Échelle de 9 millimètres pour mètre.)

t y être facilement maintenu, pendant qu'on le charge. Lors-

qu'il est chargé, et que l'autre a été vidé au bas du plan incliné, il suffit de pousser un peu le premier, pour commencer le mouvement, et il continue de lui-même. On voit sur les *fig*. 265 et 266 un plancher D, qu'on peut faire tourner autour d'un de ses côtés, et qu'on peut ainsi placer à volonté au-dessus de l'une ou l'autre des deux voies : ce plancher mobile est destiné à faciliter le chargement des wagons.

Un plan incliné, disposé comme celui que nous venons de décrire, prend le nom de *plan incliné automoteur*. Celui qui est figuré ici existe dans une mine de houille des environs de Saint-Étienne

§ 196. **Drops.** — On a imaginé, en Angleterre, un appareil nommé *drop*, qui sert au chargement des navires, et qui a de l'analogie avec les plans inclinés automoteurs ; la seule action de la pesanteur fait descendre les wagons chargés, et remonter les wagons vides. Voici quelle est la disposition de cet appareil.

Une voie de fer, soutenue par une charpente, *fig* 267, s'avance sur le bord du quai où doit s'opérer le chargement du navire. Une sorte de plateau de balance B est suspendu à l'extrémité supérieure d'un cadre de bois, qui peut tourner à charnière autour de son côté inférieur. Lorsque ce cadre mobile est relevé, le plateau qu'il supporte vient se placer dans le prolongement de la voie de fer : en sorte que chaque wagon peut passer très facilement de cette voie sur le plateau. Si le cadre mobile s'abaisse, en tournant autour de la charnière qui le termine inférieurement, le plateau vient se poser sur le pont du navire, qu'on a convenablement placé pour cela La partie supérieure du cadre mobile est retenue par un câble G, qui s'enroule sur un arbre C : aux deux extrémités de cet arbre, de part et d'autre de la voie de fer, s'enroulent, en sens contraire, deux câbles F, qui supportent inférieurement deux contre-poids D. Ces contre-poids ne sont pas simplement suspendus aux câbles F, mais ils sont encore attachés à des tringles de bois E, mobiles autour de leurs extrémités supérieures.

Lorsque le plateau B est placé dans le prolongement de la voie de fer, et qu'on amène un wagon chargé sur ce plateau, le poids du wagon le fait descendre, en abaissant le cadre mobile. Le câble G se déroule sur l'arbre C, auquel il communique un mouvement de rotation ; ce mouvement fait enrouler les câbles F, et monter les contre-poids D. Aussitôt que le wagon, porté ainsi sur le pont du navire, y a été déchargé, il ne se trouve plus assez pesant pour faire équilibre aux contre-poids D ; ceux-ci redescendent : les câbles F font tourner l'arbre C en sens contraire, en se déroulant ; le câble G s'enroule sur cet arbre, et relève ainsi le cadre mobile, avec le pla-

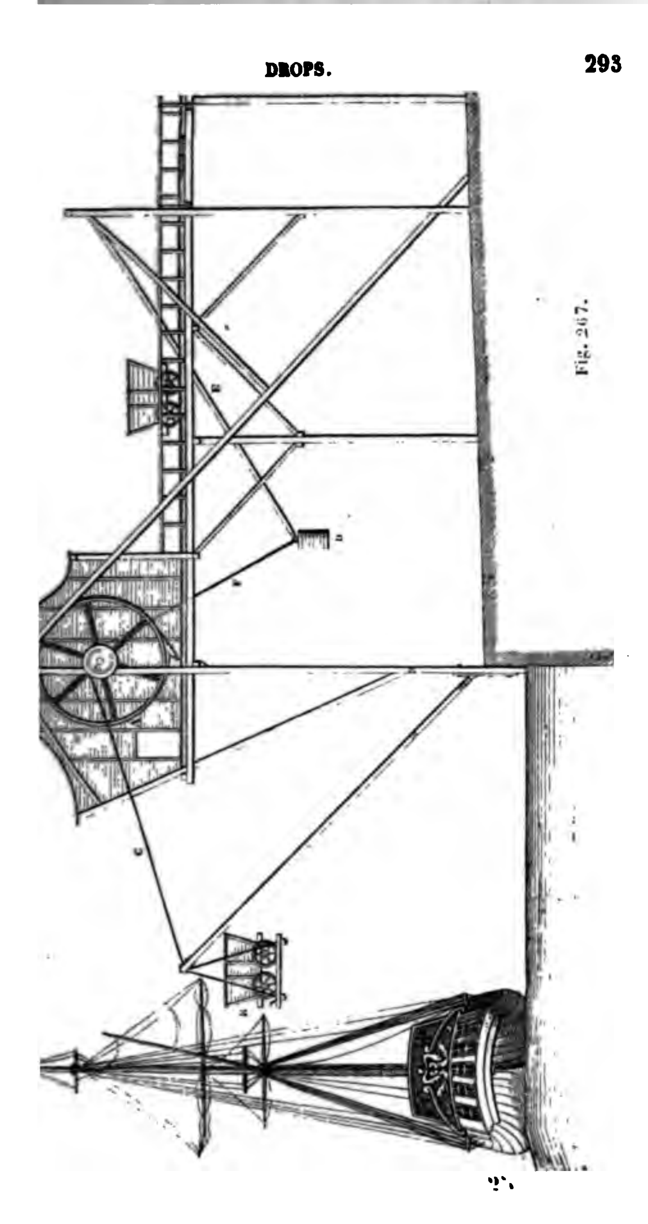


Fig. 267.

teau et le wagon vide. On emmène ce wagon, pour le remp par un autre plein, et la manœuvre recommence.

Les tringles E, auxquelles les contre-poids D sont attachés, destinées à faire varier la tension que ces contre-poids comm quent aux câbles F. Par cette disposition, la tension des câbles F d'autant plus grande, que l'axe de rotation du cadre mobile est éloigné de la verticale qui passe par le centre de gravité du wa placé sur le plateau. On n'a pas cherché par là à établir un équi entre le poids du wagon et les contre-poids; cet équilibre ne d pas avoir lieu, puisqu'il faut que le poids du wagon chargé l'e porte sur les contre-poids, et qu'au contraire ceux-ci l'emport sur le poids du wagon vide : mais on a voulu régulariser, jusq un certain point, la grandeur de la force excédante qui produit mouvement, soit dans un sens, soit dans l'autre.

L'arbre C porte un tambour A, autour duquel est disposé u frein pareil à celui que nous avons décrit dans le paragraphe 14 (page 185). Un ouvrier agit sur ce frein, à l'aide d'un levier qui e ponctué sur la figure, et empêche ainsi la vitesse du wagon de de venir trop grande, soit lorsqu'il descend, soit lorsqu'il remonte.

CONSIDÉRATIONS GÉNÉRALES SUR LES MOTEURS.

§ 197. D'après ce que nous avons vu, une machine ne peut s mettre en mouvement, et effectuer du travail utile, qu'autant qu'el est soumise à l'action d'une puissance. Tout ce qui est capable d'exe cer cette puissance s'appelle, en général, un *moteur*. Il y a divers espèces de moteurs, que nous allons indiquer successivement.

1° L'homme et les animaux sont très souvent employés po faire mouvoir des machines : on les désigne, dans ce cas, sous nom de *moteurs animés*.

2° Les ressorts, tels que ceux qui font marcher les pendules les montres, sont des moteurs. Il est vrai qu'un ressort ne pe agir sur une machine qu'autant qu'il est tendu, et qu'il faut po cela qu'un autre moteur ait préalablement agi sur lui : mais dès moment qu'il est tendu peu importe que sa tension ait été produ par telle ou telle cause : il n'en doit pas moins être considéré comm un moteur capable de faire mouvoir une machine, et de vainc les résistances qui lui sont appliquées.

3° On emploie encore, comme moteurs, des corps pesants tomban d'une certaine hauteur. Nous en avons vu des exemples dans le *horloges*, et dans les plans inclinés automoteurs.

° Les cours d'eau servent de moteurs dans une foule de cir-
tances : en agissant sur des roues hydrauliques, ils font mouvoir
quantité innombrable de moulins, de forges, de filatures, de scie-
, et en général, d'ateliers de toute espèce.

° Le mouvement de l'air, ou ce que l'on nomme le vent, est uti-
dans les moulins à vent, et forme ainsi un moteur très ré-
du.

° La force élastique que la chaleur communique à la vapeur d'eau,
en général, aux vapeurs des liquides qui se volatilisent facile-
nt, et même aux gaz, fournit un moteur extrêmement précieux, et
t l'usage, encore récent, prend un dévelo pement considérable.

° Un gaz qui a été fortement comprimé peut faire mouvoir
machine en agissant de la même manière qu'un ressort : ce
re de moteur est peu employé.

° Enfin, l'électricité doit être rangée parmi les moteurs, comme
le verrons lorsque nous nous occuperons des machines électro-
trices : mais son usage, sous ce point de vue, est jusqu'à pré-
nt très restreint.

§ 198. Les divers moteurs qui viennent d'être énumérés ici sont
n d'avoir le même degré d'importance Au point de vue de l'in-
strie, on peut dire qu'il n'y a, en réalité, que quatre moteurs,
voir : 1° les moteurs animés ; 2° les cours d'eau ; 3° le vent ; 4° la
peur.

Ces moteurs ne peuvent, en général, exercer leur action que par
termédiaire d'une machine spéciale, qui n'a d'autre objet que de
r permettre de développer leur puissance, et de la transmettre
uite aux mécanismes auxquels les résistances sont appliquées.
s machines de ce genre sont désignées sous le nom de *machines
trices* : telles sont, par exemple, les roues hydrauliques et les
chines à vapeur.

L'étude d'un moteur peut être faite sous deux points de vue dif-
ents. On peut d'abord considérer le moteur en lui-même, sans
ccuper des moyens d'utiliser son action. On arrive ainsi à se
re une idée nette de la quantité totale de travail qu'il est ca-
ble d'effectuer dans un temps donné, quantité qui ne peut ja-
is être dépassée, quelle que soit la disposition de la machine à
quelle il est appliqué. Mais on peut aussi ne pas séparer le mo-
ur de sa machine motrice, et c'est ce qu'on fait habituellement,
n de se rendre compte de la quantité de travail dont on peut
ellement disposer par l'emploi de cette machine. En comparant
suite le résultat ainsi obtenu avec celui qu'on avait trouvé quand
avait *considéré le moteur seul,* indépendamment de la machine

motrice, on est en mesure de juger du degré de perfection d
machine, d'après la portion plus ou moins grande de la pui
totale du moteur qu'elle aura rendue disponible.

L'étude d'un moteur en lui-même se fera en examin
quelle manière il peut agir, quelle force il est capable de dé
à chaque instant, quel chemin parcourt le point d'applicat
cette force suivant sa direction même. On trouvera ainsi d
sultats différents, suivant qu'il s'agira de tel ou tel moteur. S
s'occupe d'une chute d'eau, la connaissance de la hauteur
chute, et de la quantité d'eau qu'elle fournit en une heure, co
à la mesure de la puissance de cette chute, puissance qui se
tièrement déterminée. S'il s'agit d'un moteur animé, d'un h
par exemple, on reconnaîtra au contraire que sa puissance e
variable : ainsi que nous le verrons bientôt, cette puissanc
plus ou moins grande, suivant que l'homme agira avec ses ma
avec ses pieds, qu'il tirera ou qu'il poussera, qu'il exercera s
verticalement ou horizontalement. Dans tous les cas, pour an
ces divers résultats, il suffira d'employer les moyens qui nou
déjà connus. On évaluera les forces développées par les m
pendant leur action, à l'aide de dynamomètres, et l'on détern
la grandeur du chemin parcouru par le point d'application d
cune d'elles, suivant sa direction, soit en le mesurant directe
soit en ayant recours à des moyens particuliers faciles à ima

Quant à la mesure de la quantité de travail que la machi
trice rend disponible, nous allons voir comment on l'effectue
tuellement.

§ 199. **Frein dynamométrique.** — Dans la plupart des c
machine motrice fait tourner un arbre, et c'est ce mouvem
rotation qui est ensuite utilisé, pour vaincre des résistances de
sortes. C'est ainsi qu'une roue hydraulique reçoit directem
l'action de l'eau un mouvement de rotation auquel particip
qui la supporte ; cet arbre fait ensuite mouvoir des meules, de
des marteaux, etc. De même, une machine à vapeur qui fon
dans un atelier, donne un mouvement de rotation à un arb
zontal qu'on nomme *arbre de couche*, et c'est sur cet arbre
che qu'on prend le mouvement qui doit être transmis à c
des machines-outils qui doivent effectuer les travaux auxq
telier est destiné. Lorsqu'on veut mesurer la puissance de
chine motrice, on supprime toute communication de l'arbre
fait tourner avec les machines-outils, et en général avec le
tances à vaincre ; puis on applique à cet arbre une résista
tificielle, que l'on puisse facilement évaluer. En faisant

r de cette résistance, on peut faire en sorte que le mouve- la machine soit celui qu'elle prend habituellement, et que s elle se trouve exactement dans les mêmes conditions, la manière dont elle reçoit l'action du moteur. Dès lors il e déterminer la quantité de travail développée par la ma- our vaincre cette résistance, et l'on a ainsi la mesure du tra- e cette machine effectue dans les circonstances ordinaires. produire la résistance artificielle dont on vient de parler, on du *frein dynamométrique*, ou *frein de Prony*, du nom de enteur. Cet appareil est représenté par la *fig.* 268. A est

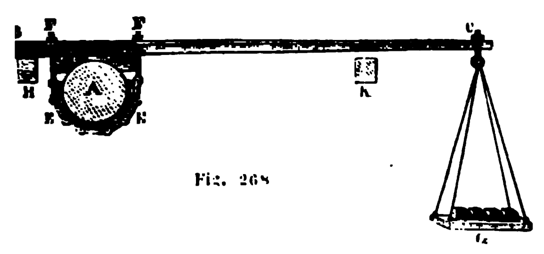


Fig. 268

e horizontal auquel le frein est appliqué. La surface de cet arbre tre pour cela exactement cylindrique; lorsque cela n'a pas lieu, i adapte un manchon de fonte, que l'on fixe à l'aide de bou- de telle façon que sa surface ait tous ses points également nés de l'axe de rotation, ou, comme on dit, que sa surface soit centrée. Un levier de bois BC est garni d'un morceau de bois nt la face inférieure est taillée de manière à emboîter une por- le la surface de l'arbre, ou du manchon s'il y en a un. Une e EE, formée de plaques de tôle articulées les unes aux au- est également garnie de petits morceaux de bois, qui viennent liquer sur la partie inférieure de la même surface : cette chaîne mine par deux boulons à vis, qui traversent le levier BC, et les extrémités desquels s'engagent deux écrous F, F. Un u G, destiné à recevoir des poids, est suspendu à l'extrémité levier BC. Des arrêts H, K, sont disposés de manière à s'op- à ce que le levier, en tournant autour de l'arbre, soit dans un soit dans l'autre, s'écarte trop de la position horizontale où être maintenu.

pposons que l'arbre A soit mis en mouvement par la machine ce dont on veut *évaluer la puissance*, et qu'on serre les écrous *de manière à appliquer fortement* sur sa surface le mor-

ceau de bois D, et ceux que porte la chaîne EE. L'adhé
se développe entre l'arbre et ces espèces de mâchoires
tendra à entraîner le levier BC dans le mouvement de
de l'arbre : mais l'arrêt H s'y oppose, et en obligeant le
à rester immobile, il détermine le glissement de l'arbre
mâchoires du frein. Le frottement qui résulte de ce g
est une résistance appliquée à l'arbre, et qui tend à dét
mouvement. On conçoit qu'on puisse arriver par le tât
à serrer les écrous F, F, de telle manière que la machine
même mouvement que lorsqu'elle fonctionne dans les circ
ordinaires ; alors le travail résistant, développé par le fr
du frein sur l'arbre, peut être pris pour la mesure de la
de travail que la machine est capable d'effectuer. Rest
évaluer ce travail.

Pour y arriver, on met des poids dans le plateau G, en
suffisante pour que le levier BC se maintienne horizontal,
cher ni l'arrêt H ni l'arrêt K. Dès lors ce levier se trouve
libre, sous l'action de ces poids et des forces de frotte
l'arbre exerce aux divers points où il touche les mâch
frein. Admettons, pour simplifier le raisonnement, que le
frein tout entier, y compris le plateau G, soit négligeable.
mons P le poids total placé dans ce plateau ; admettons
qu'au lieu de plusieurs forces de frottement appliquées
il n'y en ait qu'une seule Q, qui agira nécessairement su
tangente à la circonférence de l'arbre. Le frein ne pou
tourner autour de cet arbre, il faut, pour qu'il soit en équil
les forces P et Q soient inversement proportionnelles à l
tances respectives à son axe, ou, ce qui revient au même
sement proportionnelles aux circonférences de cercle
distances sont les rayons. Le produit de la force de frott
par la circonférence de l'arbre, sera donc égal au prod
force P, par la circonférence dont le rayon serait la di
'axe de l'arbre à la verticale passant par le point C, où
pendu le plateau G. Mais le premier produit n'est autre
le travail développé par la force de frottement Q, penda
entier de l'arbre ; le second produit, qui peut être facilem
lué, pourra donc servir de mesure au même travail. Il
multiplier ce second produit par le nombre de tours q
fait en une heure, pour avoir la quantité totale de trav
machine peut effectuer dans cet intervalle de temps.

Il est clair que le résultat auquel nous venons d'arriver
core le même, si, au lieu d'une seule force de frottemen

au frein, il en existe plusieurs appliquées en ses divers de contact avec la surface de l'arbre. Quant au poids du du plateau G, on en tiendra compte aisément, en mesurant, d'un dynamomètre, la force qu'il faut appliquer au point C, lement et de bas en haut, pour soutenir le frein, lorsque les F, F, ne sont pas serrés, et que le plateau ne contient aucun ; on ajoutera cette force au poids placé dans le plateau, avant ctuer les calculs indiqués plus haut.

si, en résumé, lorsque le frein aura été disposé sur l'arbre, aura serré convenablement les écrous F, F, et chargé en conce le plateau G, de manière que la machine marche comme linaire, et que le levier BC se maintienne horizontal, on trou de la manière suivante le travail total effectué par la machine heure On comptera les poids mis dans le plateau, et l'on utera ce qui est nécessaire pour tenir compte du poids du et du plateau : on multipliera ensuite le poids total ainsi obtenu. longueur de la circonférence du cercle qui aurait pour rayon stance horizontale de l'axe de l'arbre à la verticale passant e point de suspension du plateau : enfin on multipliera ce prerésultat par le nombre de tours que l'arbre fait en une heure. ura soin d'évaluer en kilogrammes le poids mis dans le pla, ainsi que ce qu'on doit lui ajouter : et en mètres la longueur circonférence qui doit servir à faire la première multiplica. Le résulat du calcul représentera le travail de la machine en heure, évalué en kilogrammètres (§ 78).

200. Cheval-vapeur. — Pour indiquer la puissance d'une hine motrice, on dit souvent que cette machine est de la force chevaux, de 3 chevaux, de 4 chevaux... Voici la signification cise de cette expression. On dit qu'une machine a la force d'un val, lorsqu'elle est capable d'élever 75 kilogrammes à 1 mètre hauteur, dans une seconde de temps. Sa force sera de 2 chex, de 3 chevaux, de 4 chevaux..., si elle est capable d'effectuer, s le même temps, une quantité de travail double, triple, quaple... ; c'est-à-dire si elle peut élever en une seconde de temps. mètre de hauteur, 2 fois, 3 fois, 4 fois..., 75 kilogrammes.

Il est facile, d'après cela, de calculer la force d'une machine mo-e, exprimée en chevaux, quand on a trouvé, à l'aide du frein amométrique, la mesure du travail qu'elle effectue en une re. Supposons, par exemple, que ce travail soit de 1 620 000 grammètres. En une minute la machine produira 60 fois moins, st-à-dire 27 000 kilogrammètres : en une seconde, elle produira ore *60 fois moins, c'est-à-dire* 450 kilogrammètres. Cette ma-

chine est donc capable d'élever 450 kilogrammes à 1 mèt hauteur, en 1 seconde de temps : et comme 450 est égal à 75, on dira que la machine a une force de 6 chevaux.

La quantité de travail qu'un cheval peut effectuer, dans les constances ordinaires, est loin d'être aussi grande que cel nous venons d'indiquer comme correspondant à ce qu'on app force d'un cheval. La représentation de la force d'une machi un certain nombre de chevaux, est donc de pure conventi ne fait nullement connaître le nombre de chevaux qu'il fau employer pour effectuer le même travail que la machine. A pour éviter la confusion, emploie-t-on souvent la dénominati *cheval-vapeur*, pour exprimer la force d'une machine ; au lieu dire qu'elle a la force de 6 chevaux, on dira qu'elle a la for chevaux-vapeur. Le mot *vapeur* qu'on ajoute ici au mot ch pour en préciser la signification, vient de ce que cette man d'évaluer la force d'une machine motrice a été d'abord emplo pour les machines à vapeur. Quelquefois aussi on remplace l'expre sion de cheval-vapeur par celle de *cheval-dynamique*, qui a la mê signification.

§ 201. **Moteurs animés.** — Nous ne pouvons pas donner m tenant des notions suffisantes sur le mode d'action des divers m teurs dont nous avons parlé. Nous nous contenterons donc de n occuper des moteurs animés, et, à mesure que l'occasion s'en pr sentera, nous comblerons la lacune que nous allons laisser, relati vement aux autres moteurs.

La force de l'homme peut être employée de bien des manière différentes. Il peut pousser ou tirer, soit horizontalement, soit ver ticalement, en agissant avec ses mains, et sans se déplacer ; étan assis, il peut pousser avec ses pieds ; il peut encore agir en pouss ou tirant, en même temps qu'il marche ; il peut enfin agir par s poids seulement, comme dans les roues à chevilles (§ 57). La quan tité de travail qu'il développe dans ces diverses circonstances e loin d'être la même. Il est donc important de savoir de quelle m nière sa force doit être employée, pour produire la plus grande qua tité possible de travail. Mais, en cherchant à résoudre cette que tion, on ne doit pas oublier que l'homme se fatigue en travaillan si l'on veut lui faire produire une trop grande quantité de trav dans un temps donné, il ne pourra pas travailler aussi longtem dans sa journée ; si l'on exige trop de lui dans une journée, il résultera une fatigue qui persistera dans les journées suivantes c'est ce qu'on doit toujours éviter.

En ne considérant que la grandeur de la force qu'un homme p

opper pour vaincre une résistance, on reconnait que cette force beaucoup, suivant que l'homme agit de telle ou telle manière. trouvé que le plus grand effort qu'il puisse produire correspond is où il cherche à soulever un poids placé entre ses jambes. Cet t maximum peut aller à 200, et même 300 kilogrammes, suivant ndividus : en moyenne, on peut l'évaluer à 130 kilogrammes. ais la force développée par l'homme n'est qu'un des éléments ravail qu'il peut effectuer; pour arriver à des notions exactes la grandeur de ce travail, il est nécessaire de tenir compte du nin que l'homme peut faire parcourir au point d'application de ort qu'il exerce. S'il a une très grande résistance à vaincre, il se guera beaucoup en très peu de temps, et ne pourra déplacer le it d'application de cette résistance que d'une petite quantité : si ésistance à vaincre est très faible, il pourra faire parcourir un min beaucoup plus grand à son point d'application. Dans le preer de ces deux cas, aussi bien que dans le second, un des éléments travail effectué pendant une journée aura une petite valeur, et suite le travail lui-même sera petit. Si, au contraire, la résisice à vaincre n'est ni trop grande ni trop petite, l'homme pourra, ns une journée, déplacer son point d'application d'une quantité table, et il en résultera une plus grande somme de travail. Un mme ne doit donc pas employer toute sa force, lorsqu'il se livre un travail continu : il ne doit avoir à exercer à chaque instant l'une portion de l'effort maximum dont il est capable.

C'est à l'expérience à indiquer la grandeur de la force qu'un mme doit développer, et la vitesse avec laquelle son point d'apication doit se déplacer, pour effectuer le plus de travail possible ns une journée, suivant que cette force est appliquée de telle ou lle manière. C'est ainsi qu'on a trouvé que les hommes qui maeuvrent une sonnette à tiraude (§ 158), doivent soulever chacun viron 20 kilogrammes du poids du mouton, à 1 mètre de hauteur; ils doivent battre à peu près 20 coups par minute, et 60 à 80 coups suite : après quoi ils doivent se reposer autant de temps qu'ils it travaillé. De même on a reconnu que les hommes qui manœuent un cabestan doivent exercer chacun une pression de 12 kiloammes, à l'extrémité du levier sur lequel il agit; ils doivent, en tre, marcher avec une vitesse de 0m,6 par seconde. De même core on a trouvé qu'un homme qui tourne une manivelle, dont rayon est d'environ 0m,32, doit exercer sur la poignée une presn de 7 à 8 kilogrammes, et faire faire à la manivelle de 20 à tours par minute. Pour arriver à ce dernier résultat, on emploie e *manivelle dynamométrique*, dont la poignée A, fig. 269, est

26

fixée à l'extrémité d'une lame de ressort BC. On adapte la manivelle à l'extrémité de l'arbre qu'on veut faire tourner, et on l'y assujettit à l'aide d'une vis de pression qu'on voit sur la figure. Lors-

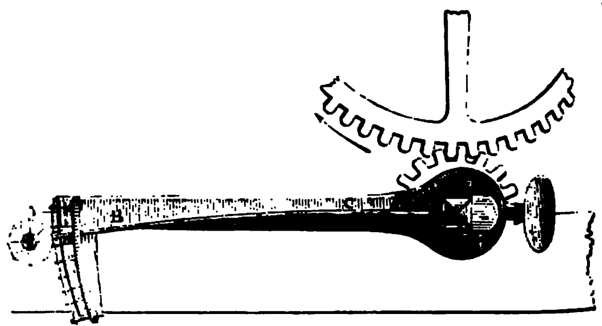


Fig. 269.

que ensuite on produit le mouvement de rotation, en agissant sur cette manivelle, le ressort fléchit, et la quantité dont il se déforme indique la grandeur de la pression appliquée à la poignée. Un arc de cercle, gradué d'avance, tourne avec la manivelle sans participer à la flexion du ressort : et il suffit de voir à quel point de division correspond un index que porte le ressort, pour connaître le nombre de kilogrammes qui représente cette pression.

En général, on peut dire qu'un homme effectue une plus grande quantité de travail dans sa journée, lorsqu'il se repose de temps en temps, que lorsqu'il agit d'une manière continue. D'un autre côté, cette quantité de travail est d'autant plus grande, que les efforts exercés par ses muscles se rapprochent plus de ceux auxquels ils sont destinés par leur nature. Considérons, par exemple, un homme qui emploie sa journée à monter et à descendre successivement une rampe ou un escalier, sans aucune charge. La simple élévation de son corps, pendant qu'il montera, donnera lieu à une certaine quantité de travail, qu'on évaluera en multipliant son poids par la hauteur totale dont il l'aura élevé suivant la verticale ; cette quantité de travail sera plus grande que celle qu'il aurait effectuée dans la même journée, en montant avec une charge et descendant à vide, l'élévation de son corps étant toujours comprise dans l'évaluation du résultat. On voit, en effet, que lorqu'un homme monte avec une charge, les muscles de ses jambes, qui sont destinés seulement à supporter son corps, se trouvent plus tendus qu'ils ne doivent l'être habituel-

[redacted]



esulte une
ne une di-
du travail
muscles.
que c'est
oscendant
nent, sans
une rampe
er, qu'un
velopper la
ntité de tra-
euvrant de
, travaillant
dant 8 heu-
ans sa jour-
280000^{km}.
ie, agissant
elle, ne pro-
nême temps
; et s'il était
er le mouton
à tiraude.
t guère plus
. Il est donc
ux de faire
vail de l'hom-
ple élévation
outes les fois
vation peut
à la produc-
u'on veut ob-
qu'on peut
emple, lors-
er des terres
un autre, en
l'appareil re-
la *fig.* 270.
se compose
poulie, dans la
elle passe une
porte à cha-
xtrémités un grand plateau analogue aux plateaux

Fig. 270.

de balance. La longueur de corde a été déterminée de manière que l'un des plateaux soit au niveau du sol inférieur, lorsque l'autre est au niveau du sol supérieur. On amène une brouette chargée de terre sur le plateau qui est en bas; en même temps un ouvrier se place, avec une brouette vide, dans l'autre plateau. Si l'ouvrier pèse un peu plus que la terre contenue dans la première brouette, il entraîne la corde; le plateau sur lequel il est placé descend du niveau supérieur au niveau inférieur, et le plateau qui contient la brouette chargée de terre s'élève au contraire du niveau inférieur au niveau supérieur Alors on décharge les deux plateaux, pour remettre une brouette chargée de terre dans celui qui vient de descendre, et une brouette vide, avec un ouvrier, dans celui qui vient de monter : les plateaux se mettent de nouveau en mouvement en sens contraire, et ainsi de suite Les brouettes pleines sont amenées au bas de l'appareil; à mesure qu'elles sont élevées au niveau supérieur, on les emmène pour les vider; puis on les ramène vides vers le haut de l'appareil; elles redescendent, et retournent à l'endroit où elles doivent être remplies pour recommencer le même mouvement. Des ouvriers sont employés, les uns au niveau inférieur, les autres au niveau supérieur, pour rouler les brouettes pleines ou vides; en même temps d'autres ouvriers sont uniquement occupés à monter du niveau inférieur au niveau supérieur, à l'aide d'une échelle placée entre les deux plateaux, et à descendre successivement, un à un, avec une brouette vide, dans l'un ou l'autre de ces deux plateaux. Un homme, placé au haut de l'appareil, agit sur la corde pour ralentir ou accélérer le mouvement, suivant que le poids du plateau descendant l'emporte plus ou moins sur le poids du plateau ascendant. Cet appareil a été employé pour la première fois dans les travaux de terrassements effectués au fort de Vincennes, près Paris, et y a procuré une économie considérable.

Lorsqu'un homme agit sur une roue à chevilles (§ 57), le travail qu'il effectue consiste uniquement dans l'élévation de son corps, qui redescend aussitôt en faisant tourner la roue; il se trouve dans des conditions analogues à celles d'un homme qui monte une échelle, pour employer ensuite son poids à la production d'un effet utile. Aussi la quantité de travail qu'il effectue, dans une journée de 8 heures, va-t-elle jusqu'à 259 000^{km}. On voit par là que les roues à chevilles sont d'excellentes machines pour utiliser la force de l'homme. Le mouvement de rotation qu'elles reçoivent de l'action d'un ou de plusieurs hommes, peut d'ailleurs être employé à tout autre usage qu'à extraire les pierres des carrières.

[redacted]

heval est très souvent employé comme moteur. Mais
ıp moins de variété que l'homme, dans la manière
eut être appliquée. Son mode d'action se réduit pres-
ıt à tirer horizontalement, dans le sens dans lequel il
ut d'ailleurs appliquer au travail du cheval les mêmes
;énérales qu'au travail de l'homme.
ximum qu'un cheval peut exercer en tirant, s'élève
à 400^k ; mais lorsqu'il travaille d'une manière con-
tirer beaucoup moins. Un bon cheval de roulier, qui
ırs par semaine, et qui fait environ 28 kilomètres par
ɜ vitesse de 8 kilomètres par heure, exerce une force
'environ 50 kilogrammes : le travail qu'il développe
e journée s'élève à $1\,400\,000^{km}$.
veut employer la force du cheval à autre chose qu'au
roiture, on le fait habituellement agir dans un *manége*.
est attelé à une pièce de bois fixée à un arbre vertical :
rnant, et fait prendre à cet arbre un mouvement de
peut ensuite se transmettre à toute espèce de machine,
peut dire que le manége est pour le cheval ce que

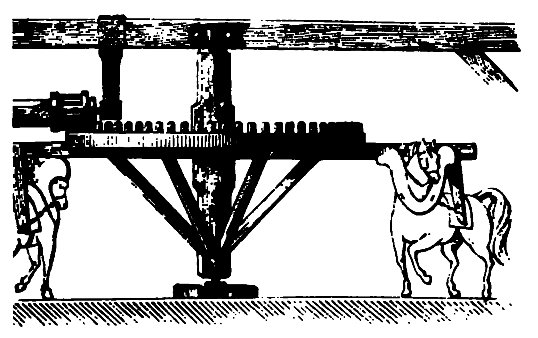


Fig. 271.

est pour l'homme. Un cheval qui travaille dans un ma-
t moins d'effet qu'un cheval de roulier, et se fatigue
pour qu'il ne soit pas trop gêné, il faut que le manége
, 13 mètres de diamètre. En comparant la quantité de
ı cheval effectue dans un manége, avec celle qui est
· un homme agissant sur une manivelle, on trouve qu'un
aut à peu près à 7 hommes.

Le travail effectué, en une seconde de temps, par un cheval attelé à un manége, ne dépasse pas 42^{km}. On voit donc que nous avons eu raison de dire (§ 200) que la force d'un cheval est inférieure à ce que l'on nomme un cheval-vapeur ou un cheval dynamique, puisqu'on entend par là une puissance capable de produire un travail de 75^{km} par seconde.

Un bœuf, attelé à une voiture, peut exercer une force de traction presque égale à celle qu'exerce un cheval; mais il produit moitié moins de travail, à cause de sa lenteur naturelle. Attelé à un manége, un bœuf effectue presque autant de travail qu'un cheval.

Un âne agissant sur un manége ne produit guère plus du quart du travail effectué par un cheval.

§ 203. **Mouvement perpétuel.**—C'est ici le lieu d'entrer dans quelques détails sur la fameuse question du *mouvement perpétuel*, dont tant de personnes se sont occupées, est s'occupent encore maintenant. Mais avant tout il est indispensable de savoir au juste ce qu'on entend sous le nom de mouvement perpétuel.

La plupart des personnes qui n'ont pas étudié la question, croient naturellement que la recherche du mouvement perpétuel consiste dans la recherche d'un corps qui soit perpétuellement en mouvement. Aussi, quand on affirme que la découverte du mouvement perpétuel est impossible, trouve-t-on d'assez nombreux incrédules, et il y en a qui prétendent prouver que cette affirmation n'est pas exacte, en donnant pour exemple la terre, dont le mouvement autour du soleil présente pour eux tous les caractères du mouvement perpétuel. Mais ceux qui connaissent la question, ceux surtout qui ont fait leurs efforts pour en trouver la solution, donnent une tout autre signification au mouvement perpétuel.

Nous avons dit que, pour vaincre les résistances appliquées à une machine, et entretenir par là son mouvement, il fallait lui appliquer une puissance : nous avons ajouté que cette puissance est habituellement empruntée aux moteurs animés, ou à une chute d'eau, ou au vent, ou à la vapeur. Quand on cherche le mouvement perpétuel, on se propose de trouver une machine qui puisse fonctionner, sans avoir recours à aucun de ces agents, ni à aucun autre du même genre ; on cherche une machine motrice qui puisse produire du travail utile, sans être soumise à l'action d'un moteur ; on veut, en un mot, construire une machine qui soit elle-même son moteur.

On comprend dès lors tout l'intérêt que présente cette question pour *ceux qui* croient que la solution en est possible, et qui passent

r cette solution. Les machines, qui rendent tant de ıme, ont toujours besoin d'un moteur Pendant hommes, les animaux, l'eau et le vent étaient les mployés. Mais, d'une part, l'emploi des hommes et traîne une dépense continuelle. D'une autre part, ne peuvent être employés que dans des positions es chutes d'eau sont limitées, et l'on ne peut pas en de nouvelles : le vent est une source de mouvement mais il présente trop d'irrégularité dans son action. les machines à vapeur a rendu un service immense, donné le moyen d'établir partout un moteur aussi veut. L'emploi d'une machine à vapeur nécessite se continuelle, comme l'emploi des moteurs animés; ense, résultant de la consommation du combustible, ure à celle qu'occasionneraient des hommes ou des sez grand nombre pour produire le même effet. che le mouvement perpétuel, on veut aller plus loin; r une machine qui puisse atteindre le même but que apeur, mais qui ne nécessite aucune autre dépense celle de son entretien Il est bien clair que celui qui eille découverte y trouverait immédiatement une esse : ce serait pour lui l'équivalent de la pierre phi-'est ce qui explique pourquoi tant de personnes s'y s et s'y appliquent encore. On peut même dire que du mouvement perpétuel serait infiniment préférable ierre philosophale Celui qui trouverait le moyen de enrichirait, il est vrai; mais il n'en résulterait pas ien marqué pour la société en général. L'or n'est pour lui-même, mais pour la valeur de convention ibuée, et cette valeur diminuerait aussitôt qu'on briquer autant qu'on voudrait. La découverte du rpétuel, au contraire, permettrait de donner un plus l'industrie, et aurait pour conséquence la fabrica-gers frais d'une foule d'objets qui concourent au hommes. L'auteur d'une pareille découverte serait le bienfaiteur de l'humanité.

ureusement cette découverte est impossible Et il ne que nous voulons dire, par là, que les moyens dont disposer soient impuissants pour nous y conduire du mouvement perpétuel n'est pas seulement im-mme; elle est d'une *impossibilité* absolue. La vérité *sition est établie rigoureusement*, tout aussi bien que

celle des théorèmes de géométrie. C'est ce qui résulte des prin exposés précédemment. Nous avons vu, en effet, que le t moteur développé pendant toute la durée de la marche d'une chine n'est jamais inférieur au travail resistant total qui s'est duit pendant le même intervalle de temps. Le premier trava habituellement égal au dernier; il lui est supérieur, lorsqu'il produit des chocs qui ont détruit une portion du travail m Une machine ne peut donc produire aucun travail utile, si elle soumise à l'action d'une puissance qui développe une quant travail moteur égale au travail utile qui doit être effectué menté du travail dû aux résistances passives qui accompagner jours la production du travail utile. Une machine ne sert transmettre l'action du moteur pour vaincre des résistances: dans cette transmission, elle n'augmente pas la quantité tot travail effectuée par ce moteur: elle la diminue plutôt, puisq résistances passives que son mouvement développe en abs une portion.

§ 204. Si l'on examine les diverses tentatives qui ont été pour arriver à la découverte qui nous occupe, on verra qu'on che généralement à produire le mouvement à l'aide d'un corp tombe d'une certaine hauteur: ce corps doit être ensuite relev la machine même, à la hauteur dont il est tombé, en même t qu'elle effectuera du travail utile, en raison du mouvement q aura reçu. En supposant qu'on ait pu disposer la machine de nière à obtenir ce résultat, on voit que le même corps pesant tombant et remontant ainsi successivement, entretiendrait le vement aussi longtemps qu'on voudrait, et donnerait lieu à la duction d'une quantité indéfinie de travail utile.

Ici ce sera une roue hydraulique mise en mouvement par l qu'on a placée dans un réservoir supérieur; la roue est empl à faire mouvoir des pompes, qui remontent dans le réservoir t l'eau qui a agi sur la roue, et qui élèvent en outre une cert quantité d'eau excédante, qui peut être utilisée.

Ailleurs ce sera une roue, taillée comme les roues à rochet horloges, et portant des tiges égales articulées dans les divers gles formés par les dents, *fig.* 272; ces tiges se terminent par boules de même poids. Si l'on fait tourner la roue dans le sen la flèche, chaque tige prend successivement des positions différe dans l'angle au fond duquel elle est articulée, en raison de l'ac de la pesanteur qui tend toujours à mettre son centre de gravi plus bas possible. D'après les idées de l'auteur de cette m le mouvement doit s'entretenir de lui-même, et vaincre en m

e résistance appliquée à la machine, parce que les boules ndent sont plus éloignées ntres de la verticale pas- l'axe de la roue, et que elles agissent sur un plus as de levier.

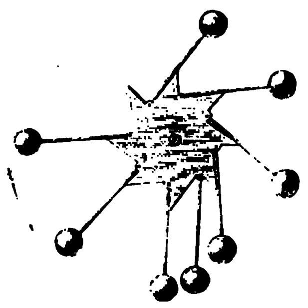


Fig. 272.

utre fois ce sera une *fig.* 273, pouvant tourner un axe B, et contenant du C; deux pièces fixes D, it à arrêter la caisse dans vement de rotation, en elle peut osciller, en ve- ppuyer alternativement ou sur l'autre de ces deux Dès que la caisse penche , le mercure coule et tend ler de plus en plus, jus- l'elle vienne buter contre deux arrêts: le mouve- prend ainsi la caisse se , à l'aide d'engrenages, à un volant qui prend un nt de plus en plus rapide: ce volant agit alors sur qui remonte le mercure, en replaçant la caisse dans tion horizontale, et l'inclinant même un peu en sens ; le mercure coule de l'autre côté, et le nouveau mouvement ne ainsi à la caisse entretient le mouvement du volant, qui encore, et ainsi de suite. Le mouvement de bascule que la end alternativement, dans un sens et dans l autre, donne à un mouvement continu du volant, qui doit pouvoir ef- u travail utile.

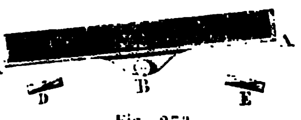


Fig. 273

t pas nécessaire d'ajouter qu'aucun des essais qui ont été rès ces idées n'a réussi. Un corps qui tombe d'une cer- teur ne peut pas déterminer un mouvement capable de le à son point de départ, et de produire en même temps un . S'il en était ainsi, le travail résistant serait plus grand avail moteur, puisqu'une portion seulement du travail ré- elle qui correspond à l'élévation du corps qui est tombé, est e au travail moteur total. La machine ne serait-elle em- produire aucun effet utile, qu'elle ne pourrait pas encore ; puisque, *si elle marchait*, le travail résistant surpasse- *e le travail moteur de tout* le travail correspondant aux

résistances passives, travail qu'on peut bien atténuer, m
ne peut pas détruire complétement Dans le premier des tr
ples qui viennent d'être cités, la roue hydraulique ne peut
qu'autant que les pompes sont disposées de manière à élev
le réservoir, une portion seulement de l'eau qui fait tourne
Dans le second exemple, les boules qui descendraient, si l
ment se produisait dans le sens de la flèche, agissent bien à
mité d'un plus grand bras de levier que les autres pour e
le mouvement, mais celles qui sont placées de l'autre côté
nombreuses Tantôt les premières l'emportent sur les d
tantôt au contraire les dernières l'emportent sur les prem
cela établit une compensation, qui n'a pas lieu à chaque
mais qui a lieu en moyenne pendant un tour entier de
Dans le troisième exemple, la caisse, en s'inclinant d'un c
duit un mouvement qui peut bien la relever, mais pas as
qu'elle commence à s'incliner de l'autre côté, et que la
mercure continue le mouvement.

Toutes ces tentatives sont fondées, ainsi que nous l'av
dit, sur des notions d'équilibre, surtout sur celles de l'équ
levier, notions qui n'ont pas été complétées par l'étude
chines à l'état de mouvement Si l'on se pénétrait bien du
d'après lequel *ce qu'on gagne en force on le perd en vitesse*
on ne s'userait pas en vains efforts pour arriver à la d
du mouvement perpétuel.

DEUXIÈME PARTIE.

ÉCANIQUE DES FLUIDES.

15. Les principes généraux de la mécanique, que nous avons s dans la première partie de cet ouvrage, s'appliquent a toute de corps. Mais, quand on considère spécialement les liquides gaz, on reconnait qu'il doit exister pour eux des principes aliers, dépendant de leur constitution propre. Cette seconde a pour objet l'exposition de ces principes; elle comprendra, me temps, leur application à l'étude des machines et des di-phénomènes mécaniques où les liquides et les gaz jouent un mportant.

PRINCIPES RELATIFS A L'ÉQUILIBRE DES FLUIDES.

06. **Transmission des pressions dans un liquide.** — Tous orps que nous voyons autour de nous sont pesants, c'est-à-dire s sont soumis à l'action de la pesanteur. Mais cette propriété pas inhérente à leur nature; elle est due à l'attraction qu'ils uvent de la part de la terre, dans le voisinage de laquelle ils se vent placés. Si chacun d'eux était porté dans un lieu de l'espace mement éloigné de la terre, et de tous les corps célestes, qui capables d'exercer une attraction analogue, ils cesseraient e pesants. Nous sommes donc en droit de supposer que cer-s corps ne sont pas pesants, sans pour cela rien changer à leur re: c'est ce que nous s faire pour les li-es dont nous allons s occuper, afin d'étu- plus facilement la smission des pressions leur intermédiaire.



Fig. 274.

oit AB, *fig* 274, un tuyau d'une forme quelconque, mais dont ection transversale est la même dans toute sa longueur. Conce-s *qu'on ait introduit dans ce* tuyau un liquide non pesant, de

l'eau par exemple ; concevons, en outre, qu'on en ait deux extrémités A et B à l'aide de deux disques, ou pist les contours s'adaptent exactement aux parois intérieures Si l'on vient à pousser le piston A, ce piston poussera le li poussera à son tour le piston B, et tendra à le faire sortir Pour maintenir le piston B dans la position qu'on lui avai on sera obligé de lui appliquer une force résistante qui s l'action de la force qui est appliquée au piston A. Or, on sans peine que cette force résistante, appliquée au pisto être égale à la force appliquée au piston A, pour qu'elle faire équilibre.

§ 207. Prenons maintenant un vase fermé, d'une forme que, *fig*. 275, et complétement rempli d'un liquide non pes ginons que l'on pratique deux ou A, B, de mêmes dimensions, dans de ce vase : qu'on adapte deux tuyau à ces ouvertures, et qu'on duise deux pistons dont les fac rieures viennent s'appuyer sur le de manière à remplacer les por la paroi qui ont été enlevées. Si l' à pousser le piston A, pour le fai à l'intérieur du vase, le liquide t sortir par l'ouverture B, en repou

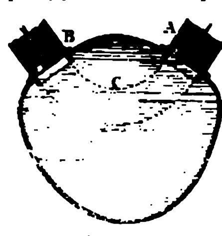


Fig. 275.

piston qui la ferme. Pour empêcher le liquide de sortir, et m le piston B dans la position qu'il a reçue, on devra lui appli force résistante, capable de faire équilibre à la force qui ten entrer le piston A à l'intérieur du vase. Il est facile de faire cette force, appliquée au piston B, doit encore être égale à est appliquée au piston A, comme dans le cas précédent. No vons, en effet, regarder les deux bouts de tuyau adaptés au tures A et B, comme étant les extrémités d'un tuyau idéal AC la section transversale soit la même dans toute sa longueur. I le piston B a été soumis à une résistance capable de faire é à la pression exercée sur le piston A, on peut supposer que tion du liquide qui enveloppe le tuyau idéal ACB perde bilité et devienne solide, sans que pour cela l'équilibre soit t Dès lors il ne reste plus de liquide qu'à l'intérieur du tuya qui se trouve avoir pour parois le liquide solidifié dont nous de parler : les deux pistons se retrouvent dans les mêmes con que ceux du § 206 : et par conséquent les forces qui leur sont *quées* doivent être égales.

[redacted]

posons maintenant qu'on ait pratiqué trois ouvertures *fig*. 276, dans la paroi du même vase, rempli, comme , d'un liquide non pesant, et s ouvertures A, B, qui seront carrées, soient placées l'une de manière à avoir un côté on ferme ces ouvertures par et qu'on applique à chacun e qui tende à le faire pénétrer u vase, ces trois forces de- ales, pour se faire mutuelle- . Car, dès le moment que les es aux trois pistons se feront e troublera pas cet équilibre que l'un d'eux soit fixé à la paroi du vase et en fasse te; et l'on sera ramené par là au cas où la paroi n'est leux ouvertures égales, ce qui entraîne l'égalité des es aux pistons qui ferment ces ouvertures.

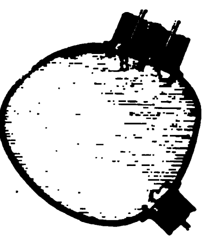


Fig. 276.

ux pistons adjacents A et B, au lieu d'être indépen- l'autre, peuvent être fixés l'un à l'autre, sans que troublé, pourvu qu'ils restent soumis aux mêmes for- nsi un piston unique AB, dont la surface sera double iston C. Les deux forces égales et parallèles, qui ées aux deux pistons A et B, se trouveront appli- unique AB, et pourront par conséquent être rem- e seule force, double de chacune d'elles, et ayant la . Ainsi on voit que, la paroi du vase étant percée ures AB, C, dont l'une est deux fois plus grande que e appliquée au piston qui ferme la première ouver- ouble de celle qui est appliquée au piston qui ferme r qu'il y ait équilibre.

e même que, si la paroi d'un vase, fermé de toutes ant un liquide non pesant, était percée de deux ou- une soit trois fois, quatre fois, cinq fois plus grande que ces ouvertures fussent fermées par des pistons rces, l'équilibre ne pourrait avoir lieu qu'autant que ée au premier piston serait triple, quadruple, quin- . Et, en général, on peut en conclure que les forces ux pistons A, B, *fig*. 277, qui ferment deux ouver- s dans la paroi d'un vase fermé et contenant un li- nt, doivent être proportionnelles aux grandeurs de *pour qu'il y ait équilibre*.

§ 209. Lorsqu'une force est appliquée au piston A, *fig* manière à le pousser vers l'intérieur du vase, ce piston pr quide; celui-ci presse à so piston B, et tend à le repouss hors. C'est pour vaincre la pre le piston B éprouve de la part d qu'on est obligé de lui appli force résistante capable de l nir en équilibre. La force qu'o plique ainsi est donc égale à c sion, et peut lui servir de m le piston B était fixé à la paroi de manière à en faire partie, i plus besoin d'être maintenu

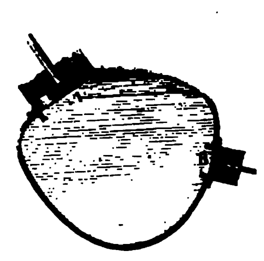


Fig. 277.

libre par une force : mais il n'en éprouverait pas moins pression de la part du liquide. Et comme le piston B. ain trouve dans les mêmes conditions que les autres portions du vase, on peut dire que la force appliquée au piston A des pressions du liquide sur toutes les parties de cette plus, d'après ce qui précède, ces pressions sont propor aux grandeurs des portions de la paroi sur lesquelles ell cent : c'est ce qui constitue le principe de la transmission sions dans un liquide.

Supposons, par exemple, que le piston A ait une s 10 centimètres carrés, et que la force qui lui est appliqu 50 kilogrammes Par suite de l'action de cette force, pressera la paroi de toutes parts : la pression qu'elle supp une étendue de 1 centimètre carré sera de 5 kilogramme etendue de 2 centimètres carrés, la pression sera de 10 mes : sur une étendue de 3 centimètres carrés, elle sera d grammes, et ainsi de suite. On dira, dans ce cas, que l exercée par le liquide sur la paroi est de 5 kilogrammes mètre carré : cette pression de 5 kilogrammes est ce que l la *pression rapportée à l'unité de surface*.

§ 210. **Pression aux divers points d'une mass —Égalité de pression dans tous les sens.**—Prenon quelconque A, *fig*. 278, à l'intérieur d'une masse liquide n contenue dans une enveloppe fermée. Nous pouvons imag petit plan *mn*, d'une direction quelconque, passe par ce le liquide exerce une pression sur les diverses parties de l le contient, pression qui pourra provenir par exemple d tion d'une force au piston B, le petit plan mn éprouver

ession sur chacune de ses deux faces, ainsi que nous allons . Concevons pour cela qu'une surface *pq*, de forme arbitraire, avec le petit plan *mn*, et s'étende de parts jusqu'à la paroi du vase, de ma- diviser le liquide en deux portions listinctes, C, D L'équilibre du liquide a pas troublé, si nous supposons que lie C soit solidifiée, et cette hypothèse difiera évidemment en rien les condi- dans lesquelles se trouve la face du *mn* qui est en regard de la partie D. alors ce plan appartiendra à l'enveloppe nfermera le liquide restant, et il éprou- en conséquence la même pression que s les autres parties de cette enveloppe, à égalité de sur-

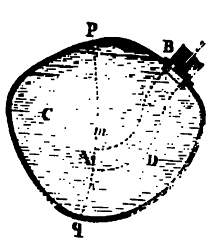


Fig. 278.

nsi l'application d'une force au piston B détermine, non seu- nt une pression du liquide sur chaque portion de la paroi du qui le contient, mais encore une pression sur chaque face d'un quelconque qu'on imagine mené par un point pris à l'intérieur masse liquide ; et toutes ces pressions sont les mêmes, pour même étendue de surface pressée. Les pressions que suppor- les deux faces du plan sont, bien entendu, dirigées perpendi- irement à ce plan.

i l'on conçoit, par le même point A, successivement divers plans que *mn*, *fig.* 278, tous ces plans éprouveront la même pression l'unité de surface : puisque, d'après ce que nous venons de voir, e pression ne dépend en aucune manière de la direction du plan. st ce qui constitue le principe de l'égalité de pression dans tous sens autour d'un point. La pression supportée par l'unité de face d'un quelconque de ces plans qui passent par le point A, ce que l'on nomme la pression au point A.

§ 211. **Pressions dans les liquides pesants.** — Les résultats cédents ont été obtenus en supposant que les liquides dont il gissait n étaient pas pesants. Nous allons revenir à la réalité, en aisant plus abstraction de l'action de la pesanteur, et nous ver s en quoi les résultats auxquels nous sommes parvenus seront lifiés.

orsqu'un vase fermé de toutes parts est rempli d'un liquide pe- , ce liquide exerce des pressions sur les diverses portions de aroi, *soit que ces pressions soient* occasionnées par l'application *e force à un piston, comme* nous l'avons supposé jusqu'à pré-

sent, soit qu'elles proviennent simplement du poids du liquide même. Mais ces pressions n'ont plus la même grandeur, à ég de surface, dans les divers points de la paroi; elles varient d point à un autre, comme nous le ver tout à l'heure, en raison de l'action de la santeur. Cependant, si l'on considère pressions que supportent les divers pl qu'on peut imaginer par un même point *fig.* 279, pris à l intérieur de la masse quide, on reconnait que ces pressions s encore égales entre elles, pour une mê étendue de surface, pourvu que cette ét due soit très petite. Voici comment on p s'en rendre compte.

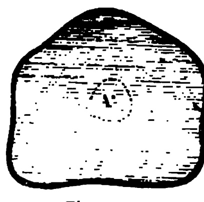


Fig. 279.

Si l'on conçoit une surface fermée, de petites dimensions, qui c prenne le point A à son intérieur, *fig.* 279, on pourra admettre tout le liquide situé en dehors de cette surface soit solidifié, s que l'équilibre soit troublé, et sans que le liquide très voisin point A cesse d'être dans les mêmes conditions. Mais alors on n'a plus que la petite quantité de liquide contenue à l'intérieur de c surface, et ce liquide exercera contre elle des pressions en ses di points. Ces pressions seront encore inégales, puisque le liquide les produit est pesant; mais on conçoit que, le poids de ce liq tout entier étant très petit, l'action de ce poids ne pourra introd que de très petites différences entre les pressions que le liq exerce aux divers points de son enveloppe : et ces différences ront d'autant plus faibles qu'on aura donné de plus petites dir sions à la surface fermée qu'on a imaginée autour du point A supposant donc que les dimensions de cette petite surface fe diminuent indéfiniment, les pressions qu'elle supportera sur se vers points, de la part du liquide qu'elle contient, approchero plus en plus d'etre égales entre elles; c'est-à-dire que ces pres approcheront de plus en plus d'être les mêmes que si le li environnant le point A n'était pas pesant. Ainsi, en admettan la surface dont nous parlons soit très petite, on pourra, sans e appréciable, regarder le liquide qu'elle contient comme sou à l'action de la pesanteur. Il s'ensuit que les pressions exe sur les divers plans qu'on peut faire passer par le point A so mêmes, à égalité d'étendue, pourvu que l'on ne donne à ces que de très petites dimensions, de manière qu'ils soient tou tiers contenus à l'intérieur de la petite surface qui nous a pour arriver à ce résultat. Le principe de l'égalité de pressi

les sens, autour d'un point, est donc vrai pour les liquides nts, aussi bien que pour les liquides non pesants.

ous venons de dire que l'égalité des pressions exercées sur les rs plans qu'on peut imaginer par un même point A d'une masse ide pesante, n'avait lieu qu'autant qu'on ne prenait que de très tes surfaces sur tous ces plans, autour du point A. Généralement pressions ne seraient plus égales entre elles, si on les prenait l'unité de surface de chacun de ces plans, à moins que cette té de surface ne fût extrêmement petite. Pour pouvoir arriver à otion de ce qu'on nomme la pression au point A de la masse lide, on conçoit que l'unité de surface de chacun des plans qu'on t faire passer par ce point soit uniformément pressée dans toute étendue, et cela de la même manière qu'elle l'est réellement s le voisinage du point A : la pression totale que supporterait si cette unité de surface ne varierait plus d'un plan à un autre, c'est cette pression totale qui forme ce qu'on appelle la pression point A.

§ 212. Examinons maintenant de quelle manière varie la pression d'un point à un autre, à l'intérieur d'une masse liquide pente, en équilibre.

Prenons d'abord deux points A, B, *fig.* 280, qui soient situés r un même plan horizontal. Nous pouvons aginer, autour de ces deux points comme ntrès, deux petits cercles égaux, dont plans soient dirigés perpendiculairement la ligne droite AB qui joint les deux ints : nous pouvons concevoir en outre que s deux petits cercles forment les deux bas d'un cylindre, dont la ligne AB serait xe, et que tout le liquide qui est en ders de ce cylindre soit solidifié. Nous urons plus ainsi qu'à considérer le liquide contenu à l'intéur du cylindre. Il est bien clair que les pressions exercées r ce liquide sur les deux bases A et B du cylindre sont égales re elles, tout aussi bien que si ce liquide n'était pas pesant : les forces qui résultent de l'action de la pesanteur sur les erses molécules du liquide, étant toutes verticales, ne tent pas plus à le faire sortir par une des bases du cylindre par l'autre. L'égalité des pressions exercées par le liquide, les deux petits cercles que nous avons imaginés autour des x points A et B avait donc lieu aussi avant qu'on ait solié le liquide situé en dehors du cylindre; et, par conséquent,

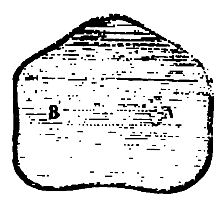


Fig. 280.

les pressions aux deux points A et B sont égales entre el
voit par là que, *dans une masse liquide pesante en équil pression est la même pour tous les points situés sur un mê horizontal.*

§ 213. Considérons ensuite deux points A, B, *fig.* 281, sit une même verticale. Nous imaginer core, autour de ces deux points com tres, deux petits cercles égaux, trac des plans horizontaux; nous regarde même ces deux petits cercles comme ses d'un cylindre ayant pour axe l AB, et nous supposerons que tout le qui est en dehors de ce cylindre so dilié. Dans cet état de choses, on v le liquide n'exerce pas des pressio



Fig. 281.

les sur les deux bases du cylindre. Si la base supérieure n vait aucune pression de la part du liquide, elle ne r nullement sur lui, et la base inférieure n'aurait à support le poids du liquide. Si la base supérieure éprouve une sion de la part du liquide, elle réagit sur lui, en pro une pression égale: cette pression se transmet, sans char grandeur, sur la base inférieure du cylindre; et cette bas rieure a, en conséquence, à supporter la pression qui lui e transmise, et, en outre, le poids du liquide contenu dans lindre. Donc, dans tous les cas, la pression que supporte inférieure du cylindre est plus grande que la pression su par sa base supérieure, d'une quantité égale au poids du qu'il contient.

Ce qui a lieu après qu'on a solidifié le liquide situé en del cylindre, avait également lieu avant cette solidification. Don un liquide pesant, la différence entre les pressions support deux surfaces égales, placées en deux points qui sont sur une verticale, est égale au poids du liquide que contiendrait un c ayant pour base une de ces deux surfaces, et pour hau distance des deux points où elles sont placées. Et si l'on obse ce que l'on nomme la pression en un point d'un liquide. pression rapportée à l'unité de surface (§§ 210 et 211), on énoncer la proposition suivante: *La pression en un point d'une liquide pesante est égale a la pression en un autre point sit ticalement au-dessus du premier, augmentée du poids du que contiendrait* un cylindre ayant pour base l'*unité de surf pour hauteur* la distance des deux points.

[redacted]

deux points A, B, d'une masse liquide pe
sont situés, ni sur une même verticale, ni sur
tal. Pour comparer
u en ces deux points,
isième point C, situé
verticale menée par
horizontal mené par
ons en B et C sont
la pression en C est
ession en A, d'une
s du liquide que ren-
yant pour base l'unité
hauteur la ligne AC, qui n'est autre chose
veau des deux points A et B. Donc, en défi-
: *La pression en un point d'un liquide pesant*
n un autre point situé plus haut que le pr-
'ds de la quantité de ce liquide que contien-
pour base l'unité de surface et pour hauteur
de ces deux points.

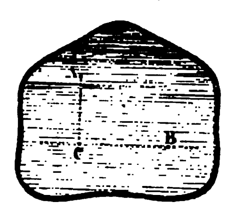


Fig. 282.

s qu'un liquide pesant exerce en divers points
le renferme se déduisent très facilement de
livers points de la masse liquide. Nous avons
est la même pour tous les points du liquide
zontal ; il en résulte qu'une petite portion de
dans le voisinage du point A, *fig.* 283, sup-
n qu'une surface d'égale
quelconque des points du
isse par ce point A La
unité de surface au point
e simplement la pression
la même que la pression
point du liquide pris au
entendre ici par pression
surface au point A, la
ait une surface plane d'une étendue égale
nt A, dans la direction de la paroi du vase,
ses parties de la même manière que dans
point A. Nous verrons également que la
la paroi, au point B, est la même que celle
onque des points du liquide, pris sur le
sse par ce point B Donc *la pression exercée*
n un des points de la paroi du vase qui le

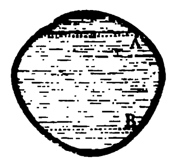


Fig. 283.

contient, est égale à celle qu'il exerce en un autre poin paroi, situé plus haut que le premier, augmentée du poi lindre de ce liquide, qui aurait pour base l'unité de surfac hauteur la différence de niveau de ces deux points. Il est si les deux points étaient situés à un même niveau, les que le liquide exercerait en ces deux points seraient égal

§ 216. Ce que nous venons de trouver permet d'évalue rence des pressions qu'un liquide exerce en deux points de du vase qui le renferme; mais cela ne conduit nullement miner les pressions elles-mêmes, qui dépendent des circo dans lesquelles le liquide est placé. En le supposant toujo tenu dans un vase fermé de toutes parts, on peut concevoi portion de la paroi du vase soit remplacée par un pisto auquel on appliquera une force, ainsi que nous l'avons précédemment pour un liquide non pesant. Cette force, t enfoncer le piston à l'intérieur du vase, presse le liquide: presse à son tour les diverses parties de la paroi qui l'em céder à l'action du piston. Mais ces pressions, transmises à par le liquide, ne sont plus les mêmes, à égalité de surface cela avait lieu dans le cas d'un liquide non pesant : elles o elles des différences qui résultent de l'action de la pesante liquide, différences dont nous avons trouvé la grandeur.

Sauf cette modification, due au poids du liquide, la tran des pressions s'effectue de même que dans les liquides non que nous avions considérés d'abord. On peut même, quel faire abstraction du poids quide, lorsque les pression sont appliquées, et qu'il aux parois, sont très gra que les dimensions du va le sens vertical, sont assez On n'altère ainsi les divers sions que de quantités qui signifiantes, relativement grandeurs respectives.

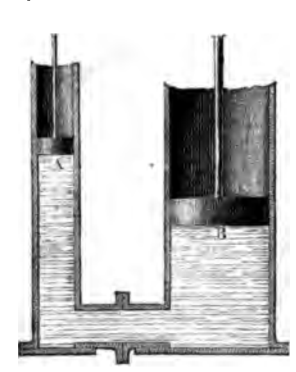


Fig. 281.

§ 217. C'est sur le princ transmission des pressions liquides qu'est fondée la *p draulique*, imaginée par Soient deux cylindres creu fig. 281, qui communiq leurs parties inférieures, et dans lesquels peuvent se mou

s. Supposons que les portions de ces cylindres, qui sont au-
s des pistons, sont remplies d'eau, ainsi que le tuyau qui les
mmuniquer l'un à l'autre. Si l'on vient à exercer une pression
piston A, cette pression se transmettra au piston B, en s'ac-
ant dans le rapport des surfaces des deux pistons. Si, par
ple, la surface du piston A est 100 fois plus petite que celle du
B, une pression de 5 kilogrammes appliquée au premier
, de haut en bas, fera supporter au second, de bas en haut,
ression de 500 kilogrammes (nous négligeons ici le poids de
. Cet appareil permet donc d'exercer une pression aussi grande
voudra, avec une force donnée, puisqu'il suffit pour cela de
re le piston B assez grand relativement au piston A. Il peut
ssimilé au levier, à l'aide duquel on peut atteindre le même

e piston B cède à l'action de la pression qu'il supporte, et
d'une certaine quantité, le piston A devra s'abaisser : mais
ux pistons ne marcheront pas également. Le volume de l'eau
rester le même, la quantité dont la capacité intérieure du
liminue d'une part, en A, doit être égale à celle dont elle
nte d'une autre part en B ; et comme ces quantités sont les
es de deux cylindres ayant pour bases les surfaces des deux
, et pour hauteurs les chemins que ces pistons parcourent,
uit que ces chemins parcourus par les deux pistons sont in-
ent proportionnels à leurs surfaces. Donc si, d'une part, une
n de 5ᵏ, appliquée au piston A, détermine une pression de
appliquée au piston B, d'une autre part, le premier piston
era 100 fois plus vite que le second : donc enfin, comme
e levier, *ce qu'on gagne en force, on le perd en vitesse.*
s nous contenterons ici de faire connaître le principe de la
hydraulique, remettant à faire la description de cette ma-
telle qu'elle est employée, après que nous aurons étudié les
s.

18. **Surface libre d'un liquide pesant.** — Dans ce qui pré-
nous avons considéré la masse liquide pesante, qui faisait l'objet
s recherches, comme remplissant complétement la capacité
vase fermé de toutes parts. Lorsqu'il n'en est pas ainsi,
ue le volume du liquide soit plus petit que la capacité du
ermé, soit que le vase soit ouvert dans sa partie supérieure,
face de la masse liquide n'est pas en tous points en contact
a paroi du vase. Le liquide, cédant à l'action de la pesanteur,
ce au fond du vase, et il présente, dans sa partie supérieure,
rface libre dont nous allons nous occuper.

Si les molécules liquides ne sont soumises qu'à l'action santeur, outre celle des forces moléculaires qui existent et qu'aucune pression ne soit appliquée aux divers points face libre du liquide, cette surface libre sera plane et hor Pour nous en rendre compte, observons que tout ce que no trouvé précédemment, relativement aux pressions dans u pesant en équilibre, est tout aussi vrai dans le cas d'un liq miné par une surface libre, que dans le cas d'un liquide qu un vase fermé. Rien ne s'oppose, en effet, à ce que nous im que le vase dans lequel est placé un liquide terminé par un libre, devienne un vase fermé, à l'aide d'une paroi idéale ten trait sur toute cette surface libre, en n'exerçant aucune en ses divers points; l'addition de cette paroi ne modifiera les pressions qui ont lieu à l'intérieur du liquide, ni cel exerce sur les différentes parties du vase qui le supportent. sons donc que la surface libre d'un liquide p soit pas plane et horizontale, et nous verr est impossible que ce liquide soit en équilib nons pour cela, sur la surface libre, deux po B, *fig*. 285, qui ne soient pas à la même ha nous menons, par ces deux points, deux v AC, BD, et que nous les terminions en deu C, D, situés sur un même plan horizontal. sions en ces deux derniers points ne se égales : car, les pressions en A et B étai celles qui auraient lieu en C et D seraient les poids de de dres de liquide, ayant pour base l'unité de surface, et l teurs, l'un AC, l'autre BD. Cette inégalité des pressions c conséquence nécessaire de ce que les points A et B ne s un même niveau, nous démontre que le liquide ne peut p équilibre avec une pareille forme de surf puisque dans tout liquide pesant en équ pressions doivent être les mêmes pour tous situés sur un même plan horizontal (§ 212

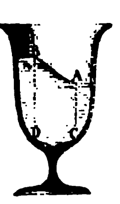


Fig. 285.

§ 219 On peut encore faire voir d'une nière que la surface libre d'un liquide, do lécules ne sont soumises qu'à l'action de teur, doit être plane et horizontale, pour quide soit en équilibre. Si cette surface forme indiquée par la *fig*. 286, une molé tuée sur une partie inclinée de cette surface, se mettrait rement en mouvement. Voyons en effet de quelle manière



Fig. 286.

orce verticale dirigée suivant AB, tend à la déplacer, ant avec les actions qu'elle éprouve de la part des mo- ıes. Ces actions ne peuvent provenir que de molécules hées: la plus grande distance à laquelle elles se font llement petite, que l'on peut regarder la portion de la qui environne le point A, jusqu'à une pareille distance le ce point, comme étant une portion de surface plane. clair que les forces moléculaires auxquelles la molécule se sont disposées symétriquement tout autour de la per- AC à la surface libre, et qu'en conséquence la résultante s (§ 36) sera dirigée suivant cette perpendiculaire. Sup- tenant que le poids de la molécule soit décomposé en une e suivant AC, et une autre force perpendiculaire à AC, dirigée dans le plan tangent à la surface au point A. La ces deux composantes pourra bien être détruite par la les actions moléculaires, dont la direction est la même: onde composante aura tout son effet, et fera glisser la sur la surface du liquide. L'équilibre ne peut donc pas tant que la surface libre n'est pas plane et horizontale.

ressions supportées par les parois. — Lorsqu'un li- ıt, en équilibre, est terminé par une surface libre dont les ts ne supportent aucune pression, il est facile de trouver r de la pression qui a lieu en chaque point de la masse aussi de celle que le liquide exerce sur chaque portion de ntre laquelle il s'appuie. Pour avoir la pression au point 7, on observera que la pression est nulle au point B de la ıre qui est situé verticalement au-dessus r; donc, d'après le § 213, la pression au t égale au poids d'un cylindre du liquide qui aurait pour base l'unité de surface, uteur la distance verticale AB du point A e libre du liquide. De même, la pression ı C, sur la paroi du vase qui contient le t dirigée suivant la perpendiculaire CD on de paroi qui avoisine le point C, est oids d'un cylindre du liquide, qui aurait l'unité de surface, et pour hauteur la distance verticale nt C à la surface libre du liquide.

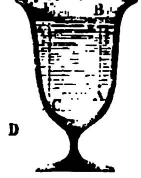


Fig. 287.

quide dont on s'occupe est de l'eau, il suffira de se rappe- centimètre cube d'eau pèse 1 gramme (1), pour pouvoir

ne 1 centimètre cube d'eau pèse 1 gramme, il faut que l'eau soit pure, et

évaluer facilement en nombres les pressions exercées pa
Prenons, par exemple, le centimètre carré pour unité d
nous trouverons que la pression au point A, *fig.* 287,
de grammes qu'il y a de centimètres dans la hauteur AI
la pression que le liquide exerce en C, sur la paroi du va
tant de grammes qu'il y a de centimètres dans la hau
l'on prenait le décimètre carré, ou le mètre carré, pour u
face, ces pressions seraient d'autant de kilogrammes, ou
fois 1000 kilogrammes, que les hauteurs AB, CE, conti
décimètres, ou de mètres.

Dans le cas où le liquide considéré ne sera pas de
pourra déterminer les pressions qu'il exerce, qu'autant
naîtra le rapport qui existe entre le poids d'un certain v
liquide et le poids d'un égal volume d'eau, c'est-à-dire
nomme la *densité* du liquide Prenons pour exemple le m
la densité est 13,6 ; nous observerons que, d'après cett
poids d'un centimètre cube de mercure sera de 13gr,6
quence, nous pouvons dire que la pression en A, *fig.* 28
au centimètre carré, est d'autant de fois 13gr,6, que la
contient de centimètres.

§ 221. Il résulte évidemment de ce qui précède qu
de prendre la pression rapportée à l'unité de surface en
la paroi, on voulait obtenir la pression supportée par u
tite portion de cette paroi, on n'aurait qu'à évaluer le
cylindre du liquide proposé, qui aurait pour base cette p
de paroi, et pour la hauteur la distance verticale d'un de se
dessous de la surface libre du liquide.

Lorsqu'on voudra évaluer la pression supportée par
quelconque de la paroi contre laquelle le liquide s'appu
décomposer cette portion de paroi en très petites parties
minera ensuite la pression exercée par le liquide sur cha
parties, puis on composera entre elles toutes les pressio
tenues.

Si la portion de paroi qu'on considère est plane, toute
sions supportées par ses diverses parties auront des dir
rallèles, et par suite ces pressions auront toujours une rés
sera égale à leur somme (§ 25). Concevons qu'on ait dé
centre de gravité de la portion de la paroi qui nous occupe, e

que sa température soit celle du *maximum* de densité. Mais dans les appli
qu'il s'agit de trouver les pressions exercées par l'eau ordinaire, on peut
1 centimètre cube de cette eau pèse toujours 1 gramme ; l'erreur comm
généralemen sans importance.

comme une surface pesante (§ 40) : la résultante dont nous ve-
de parler sera égale au poids d'un cylindre du liquide, qui
it pour base toute cette portion de paroi, et pour hauteur la
nce verticale de son centre de gravité au-dessous de la surface
du liquide. Quant au point d'application de la résultante, point
l'on nomme le *centre de pression*, ce ne sera pas le centre de
ité de la portion de paroi que l'on considère, mais un point situé
bas que ce centre de gravité. Nous nous contenterons d'énoncer
résultats, que l'on démontre dans les traités de mécanique ra-
nelle, et d'en vérifier l'exactitude dans un exemple particulier.

222. Soit AB, *fig*. 288, une paroi plane et inclinée contre la-
lle vient s'ap-
er une masse
u en équilibre.
posons que
e paroi ait la
ne d'un rec-
gle, et que
x de ses côtés
ent horizon-
x; ce sera, par
mple, une van-
destinée à main-
ir le liquide, et
vant se lever pour le laisser couler en cas de besoin. Nous ad-
ttrons, comme précédemment, qu'aucune pression n'agisse sur
surface libre du liquide, et que cette surface, qui sera plane et
rizontale, vienne se terminer en C sur la paroi plane que nous
nsidérons ; l'eau pressera donc
ulement la portion CB de cette
roi, portion qui sera également
ctangulaire. Pour évaluer la
ession exercée par l'eau sur
nt ce rectangle, nous le divise-
ns en un grand nombre de ban-
s horizontales, en traçant idéa-
ment sur sa surface des paral-
les à sa base, également éloi-
ées les unes des autres, ainsi
e le montre la *fig*. 289. Nous concevrons ensuite que chacune de
s bandes soit divisée à son tour en un grand nombre de petits rec-
gles égaux, par des *lignes perpendiculaires* à sa longueur.

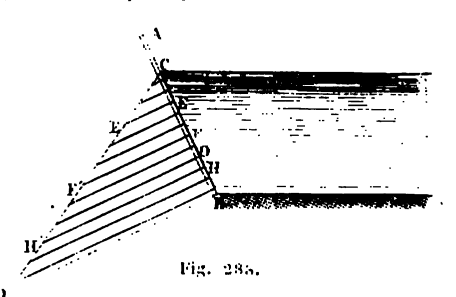


Fig. 288.

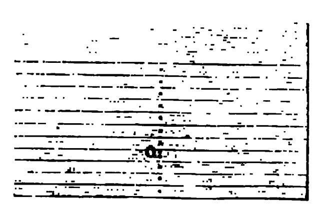

Fig. 289.

fig. 290. La pression supportée par chacun de ces peti
sera égale au poids d'un prisme d'eau ayant pour base
et pour hauteur la
ticale d'un de ses p
face libre du liquid

Fig. 290.

pressions supporté
vers rectangles, dans lesquels une même bande a été
sont égales entre elles, puisque ces rectangles sont tous
profondeur au-dessous de la surface libre du liquide. L
de ces pressions, obtenue en faisant leur somme, sera
au poids d'un prisme d'eau qui aurait pour base la
entière, et pour hauteur la distance verticale d'un que
ses points à la surface libre : de plus, le point d'ap
cette résultante sera placé au milieu de la longueur de
au point où se croiseraient ses diagonales.

Toutes les pressions résultantes, qui correspondent a
bandes dans lesquelles la paroi tout entière a été d
peuvent être représentées par des lignes droites telle
FF', HH', *fig.* 288, dirigées perpendiculairement a
Ces lignes droites, menées par les centres des bandes, de
les longueurs proportionnelles aux forces auxquelles el
pondent (§ 19), et par conséquent aussi proportionnelle
tances verticales de ces centres à la surface libre de l'e
encore à leurs distances au point C : leurs extrémités
sont donc toutes situées sur une même ligne droite CD p
le point C où aboutit la surface libre du liquide. Il ne s'ag
de trouver la résultante de toutes les forces parallèles
sentent ces lignes, résultante
pression totale supportée par
rectangulaire AB.

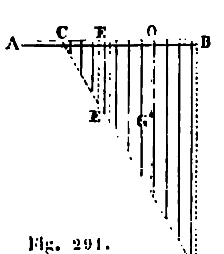


Fig. 291.

Pour y arriver, imaginons que
soit placée horizontalement, com
que la *fig.* 291 : les lignes qui rep
les forces appliquées aux centr
verses bandes dans lesquelles no
décomposée deviendront vertica
pourrons alors concevoir que
soient remplacées par des tiges p
même longueur, suspendues à la
et tellement choisies que le poids de chacune d'elles soit équ
la force dont elle tient la place. La paroi AB sera charg
poids de ces tiges, comme elle l'était précédemment par la p

divers points. Or, si ces diverses tiges sont aplaties, de résenter une largeur uniforme assez grande pour être en unes avec les autres, on voit que la charge totale, sup- la paroi AB, n'est autre que le poids du triangle pesant mme ce poids est une force verticale, appliquée au centre ; du triangle, il s'ensuit que la résultante définitive des xercées par l'eau sur les diverses parties de la paroi AB point O, situé verticalement au-dessus du centre de gra- it qui est en conséquence au tiers de la longueur BC, a int B. Ainsi le centre de pression, pour la paroi rectan- que nous considérons, *fig*. 288, est placé sur la ligne s milieux des côtés horizontaux du rectangle pressé par tiers de cette ligne à partir du fond.

la grandeur de la pression totale, on voit par la *fig*. 294 it la même, si toutes les tiges pesantes, au lieu de croître nt en longueur de C en B, avaient toutes la même lon- elle qui est au milieu de CB. On peut donc dire que la ale, supportée par la paroi rectangulaire AB, est égale à supporterait, si tous ses points a même distance verticale de libre que son centre de gra- st le milieu de BC ; ou bien cette pression totale est égale l'un prisme d'eau qui aurait toute la surface pressée, et ur la distance verticale du cen- ité de cette surface à la sur- u liquide.

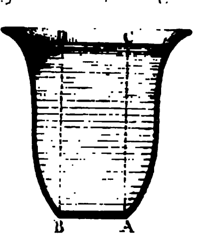


Fig. 292.

l résulte de ce qui précède que exercée par un liquide sur le vase qui le contient, *fig*. 292, u poids de la colonne ABCD situé verticalement au-dessus ; en sorte que cette pression ne de la grandeur du fond, et de de la surface libre du liquide. des parois latérales du vase aucune manière sur cette t, lors même que le vase serait s le haut, *fig*. 293 et 294, la ur le *fond serait toujours égale u liquide que contiendrait* le cylindre ABCD, quoique

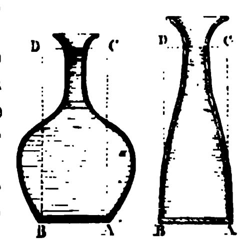


Fig. 293. Fig. 294.

le contour de ce cylindre ne soit pas tout entier contenu à l' du liquide.

Cette conséquence singulière des principes dont nous v reconnaître l'existence peut être vérifiée de la manière s à l'aide de l'appareil de de Haldat. Cet appareil, *fig.* 295.

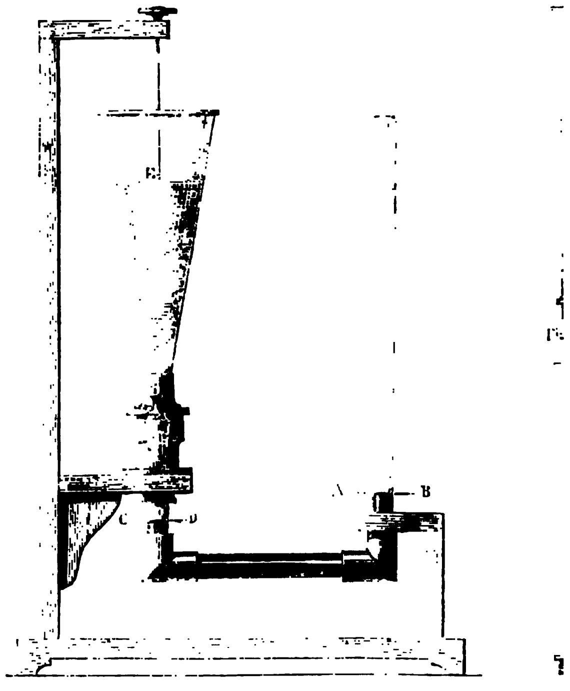


Fig. 295. Fig.

pose d'un tube horizontal, aux deux extrémités duquel sont deux autres tubes qui se relèvent verticalement. L'un de dernièrs tubes, plus court que l'autre, est muni d'une g métallique *a* portant intérieurement un filet de vis, à laquelle fixer successivement des vases de formes différentes. Le v sur cette garniture métallique, dans la *fig.* 295, s'élargit c *ment* depuis le bas jusqu'en haut, et présente ainsi à peu *forme* d'un entonnoir. Les fig. 296 et 297 représentent de

ses, qui peuvent être montés sur la même garniture métallique ; sont de simples tubes de diamètres différents, qui s'élargissent le haut pour qu'on puisse facilement y verser un liquide. Pour l'expérience à laquelle cet appareil est destiné, on verse du rcure à l'intérieur, jusqu'à ce que le tube horizontal en soit in, ainsi qu'une portion de chacun des deux tubes verticaux. Le rcure monte également dans ces deux tubes : mais si l'on vient à ser sur la surface libre de ce liquide dans le tube de gauche, il refoulé dans l'autre tube, et s'y élèvera d'autant plus que la ssion aura été plus forte. Pour produire cette pression, on verse l'eau dans le vase qui surmonte la garniture métallique *a*. L'eau nt s'appuyer sur la surface libre CD du mercure, surface qui me en réalité le fond du vase qui contient l'eau ; et la pression le mercure éprouve le fait monter dans l'autre tube, jusqu'au eau AB. On marque ce niveau sur le tube, en y collant un petit ex de papier. Cela fait, on retire l'eau à l'aide d'un robinet dont garniture métallique *a* est munie : on dévisse le vase qui surte cette garniture, pour le remplacer par un autre d'une forme érente, *fig.* 296 ou 297 ; puis on verse de l'eau dans le nouveau e, jusqu'à la même hauteur que précédemment, ce que l'on renaît à l'aide d'une tige E, dont l'extrémité inférieure doit seulet toucher la surface du liquide. En examinant alors la surface e du mercure dans le tube de droite, on voit qu'elle se trouve niveau marqué par l'index de papier : la pression supportée par surface CD du mercure est donc la même dans les deux cas, ique les parois latérales des vases, auxquels cette surface a successivement servi de fond, aient des formes très différentes.

§ 224. Si un vase avait un large fond, et se rétrécissait ensuite manière à présenter dans toute sa hauteur des dimensions nsversales plus petites que celles de son fond, *fig.* 294, la ssion exercée sur le fond par le liquide contenu dans ce vase ait plus grande que le poids total du liquide. Voici comment on it se rendre compte de ce résultat, qui semble, au premier abord, e tout a fait impossible.

Si l'on pèse un vase vide, puis qu'on le pèse de nouveau après y oir versé un liquide, l'augmentation de poids qu'on trouve est ale au poids du liquide qui a été mis dans le vase. Voyons de elle manière le liquide agit sur le vase, pour lui communiquer te augmentation de poids. Chaque portion de la paroi intérieure vase qui est touchée par le liquide en éprouve une pression dendant de son étendue et de sa distance verticale à la surface re du liquide. Ce sont toutes ces pressions, exercées par le liquide

sur les diverses parties de la paroi du vase avec laquel contact, qui se composent pour donner lieu à une résult au poids de tout le liquide; en sorte qu'en définitive l soumis à son poids propre, et à l'action de cette résultan ne faut pas confondre la résultante dont nous parlons av sion que le liquide exerce sur le fond du vase; car ce qu'une partie de la surface qui est touchée par le liquide. tante de toutes les pressions que le liquide exerce cont peut s'obtenir en composant entre elles les pressions ex divers points des parois latérales, puis composant la partielle ainsi obtenue avec la pression supportée par le il peut arriver que cette résultante partielle, au lieu d'aug pression appliquée au fond du vase, en se composant av diminue au contraire. C'est ce que nous ferons facilem prendre.

La pression en un point C de la paroi d'un vase, *fig.* dirigée suivant la ligne CD perpendiculaire à la paroi en Cette pression, qui agit du dedans au dehors, peut être dé en deux forces, dont l'une CE est horizontale, et l'autre CF ticale. La dernière composante est dirigée de bas en hau *fig.* 298 : elle aurait été dirigée de haut en bas, si le po été pris plus bas, à une petite distance AB. Si l'on effectue une décomposition pour toutes les pressions que supporte verses portions de la paroi latérale du trouvera une série de composantes ho telles que CE, et une série de composa ticales telles que CF. Les composan zontales, dont les directions divergen tour du vase, se détruisent mutuellem qu'on le reconnaît en étudiant la que à fond : il est clair d'ailleurs que, si e détruisaient pas, elles tendraient à fair le vase horizontalement, ce qui évidemment ne peut pa

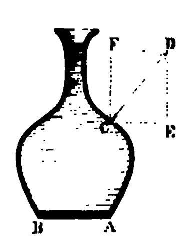


Fig. 298.

Quant aux composantes verticales, elles sont toutes entre elles; les unes sont dirigées de bas en haut, les haut en bas. Ces composantes verticales pourront d remplacées par une force unique, également verticale, dirigée de bas en haut ou de haut en bas, suivant les c La force unique ainsi obtenue sera précisément la résult tielle dont nous avons parlé plus haut. On voit donc q *résultante* partielle augmentera ou diminuera la pression

[redacted]

ase, en se composant avec elle, suivant qu'elle agira ou de bas en haut. Dans le premier cas, la pression .e fond du vase sera plus petite que le poids total du e second cas, elle sera plus grande que ce poids.

liquide pesant, en équilibre, se trouve en contact avec ıre d'une portion de paroi plane et horizontale, il la alement et de bas en haut, de manière à la soulever; ju'elle supportera ainsi sera égale au poids d'un cy-e qui aurait pour base cette portion de paroi, et pour tance verticale à la surface libre du liquide. C'est ce ıfier par l'expérience suivante.

n large tube de terre ouvert par les deux extrémités, uit verticalement dans un vase contenant de l'eau, .intenant un disque de verre *ab* constamment appliqué ds de son extrémité infé-› d'une ficelle qui est fixée et qui sert à le soutenir. t pas s'introduire dans le son ouverture inférieure r le disque *ab*: mais elle en haut sur ce disque, et ›ver, ce que l'on reconnait ›bservant qu'il ne tombe › qu'on abandonne la ficelle ›i jusque-là à le soutenir. que la pression supportée ıt par le disque, pression de tomber, est bien égale ı cylindre de liquide qui ıe pour base, et la distance ı la surface libre du liquide il suffit de verser de l'eau du tube. La pression que rce sur la face supérieure ıd à contre-balancer celle e sur sa face inférieure; ı contre-balance compléte-and l'eau versée dans le tube s'est élevée au ni-de l'eau à l'extérieur: c'est alors seulement que le ›st plus soutenu par rien, et qu'il tombe au fond du



Fig. 299.

tion des principes précédents, qui résulte de cette expé-

rience, peut ne pas paraître entièrement exacte, en raison de ce le disque que l'on emploie a ordinairement, pour la commodi l'opération, un diamètre plus grand que celui du tube. Mais o observer que la partie de ce disque qui déborde tout autour d est également pressée par le liquide sur sa face supérieure et s face inférieure ; en sorte qu'on ne doit pas en tenir compte. l'on ne doit regarder réellement comme pressée de bas en ha la portion de la face inférieure du disque qui est située au-des du tube.

§ 226. Nous pouvons, à l'aide de ce qui précède, nous r compte de la grandeur des pressions supportées, dans certains par les surfaces contre lesquelles s'appuie un liquide. Prenons p exemple un *serrement*, espèce de cloison que l'on construit à l'inté d'une mine, dans une galerie AB, *fig.* 300, pour intercepter l



Fig. 300.

communication entre la partie A et la partie B et empêcher ainsi q les eaux qui arrivent en B, par des fissures du terrain, ne viennent in der la partie A. En B, la galerie se remplit complétement d'eau, et liquide s'étend sans discontinuité dans toutes les fissures qui y comm niquent, jusqu'à une grande hauteur au-dessus de la galerie, haute qui va souvent à plusieurs centaines de mètres Supposons, pour fi les idées, que la surface libre de l'eau, dans les fissures du terrain, s a 100 mètres au-dessus du centre du serrement. La pression support par un mètre carré de la surface du serrement sera égale au poids 100 mètres cubes d'eau, c'est-à-dire qu'elle sera égale à 100 000 k logrammes; si le serrement a une surface de 2 mètres carrés, pression totale qu'il supportera sera de 200 000 kilogrammes. (conçoit par là combien on doit apporter de soin à la construction d' serrement, pour qu'il puisse résister à une si énorme pression. Souve on le construit en forme de voûte, *fig.* 300, de manière que la pre sion s'exerce sur la surface convexe de cette voûte ; par cette di



voit que le serrement ne peut céder à la pression du
:n écartant les parois de la galerie contre lesquelles il

partie B de la mine qui est inondée, l'eau exerce aussi
on énorme sur toutes les parois qu'elle touche. Cette pres-
ce aussi bien sur les parois supérieures des cavités où
andue, que sur leur sol et sur les parois latérales. Aussi
ibue-t-elle puissamment, en pareil cas, à soutenir le ter-
st au-dessus de ces cavités ; et si l'on vient à l'épuiser à
ompes, pour reprendre les travaux dans les parties de la
taient inondées, il se produit des éboulements nombreux,
de ce que le terrain n'est plus soutenu comme il l'était
it.

Surface de séparation de deux liquides. — Lorsque
des différents, non susceptibles de se mêler l'un avec l'autre,
s ensemble dans un vase, ils occupent chacun une portion
cité du vase, et se touchent le long d'une certaine surface
ert de limite commune. Si les deux liquides n'ont pas la
nsité (§ 220), et c'est ce qui arrive généralement, l'équili-
eut subsister qu'autant que la surface qui les sépare est
horizontale. Admettons, en effet, que cette surface n'ait pas
points sur un même plan horizontal, *fig.* 301, et nous allons
l'équilibre ne pourra pas avoir lieu Soient
x points situés sur un même plan horizon-
le liquide inférieur ; et C, D, deux autres
ués verticalement au-dessus des deux pre-
ussi sur un même plan horizontal, dans le
supérieur. Les verticales AC, BD, perce-
urface de séparation des deux liquides aux
, F ; et l'on pourra supposer que les points
nt été choisis de manière que les hauteurs
soient inégales, ce qui est toujours possible,

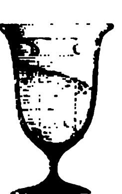


Fig. 301.

ypothèse qui a été faite. Si l'équilibre a lieu, les pressions aux
, D, doivent être égales (§ 212). Mais en appliquant ici le rai-
nt du § 213, on trouvera que la pression en A, sur une très
rface horizontale, sera égale à celle qui a lieu en C, sur une
surface, augmentée du poids du liquide qui serait contenu dans
dre vertical ayant ces deux surfaces pour bases inférieure et
re. De même, la pression en B, sur une surface de même
, sera égale à la pression qui a lieu en D, sur une surface égale,
tée du poids du liquide que contiendrait un cylindre vertical
it de B en D, et ayant ces deux surfaces pour bases. Mais le



pas égales entre elles. Donc, l'équilibre ne peut pas
qu'une conséquence nécessaire de cet équilibre, c'est
sions soient les mêmes, à égalité de surface, pour t
situés sur un même plan horizontal, pris comme on v
rieur de la masse liquide (§ 212).

Nous pouvons donc dire que, toutes les fois que deu
sants, de densités différentes, se trouveront dans un
ils se disposeront de manière que leur surface de s
plane et horizontale. Nous pouvons dire en outre que
plus lourd, celui dont la densité est la plus grande, s
dessous de l'autre. Cette dernière condition n'est pas
pour l'équilibre, qui aurait lieu tout aussi bien, si le liq
dense était au fond du vase, et qu'il fût surmonté du li
dense : mais dans ce cas l'équilibre serait instable,
mobilité des liquides ferait que la plus légère cause l
pour ramener le liquide le plus dense au fond du vas

Si un même vase contient plus de deux liquides, de
sités, et non susceptibles de se mêler, il est clair que c
disposeront les uns au-dessus des autres, de manière q
sités décroissent en allant du fond à la surface, et que
séparation de deux d'entre eux soit plane et horizontal
que si l'on verse dans un vase du mercure, de l'eau
qu'on agite le tout et qu'on le laisse ensuite reposer, l

ce du liquide dans l'autre vase. C'est ce dont nous nous
mpte facilement de la manière suivante.

B, *fig.* 302, deux points pris à l'intérieur du liquide.
e horizontale qui
tuyau de com-
des deux vases ;
xige que les pres-
ces deux points
es (§ 212). La
point A est égale
un cylindre du
e l'on considère
base l'unité de

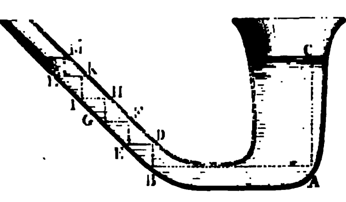


Fig. 302.

pour hauteur la distance AC du point A à la sur-
u liquide dans le vase de droite. La pression au point B
vera pas aussi facilement, en raison de la forme du vase
; voici comment on pourra l'obtenir. La pression en B
la pression en D, augmentée du poids d'un cylindre du
nt pour hauteur BD, et pour base l'unité de surface. La
n D est la même que celle qui a lieu en E ; mais la pres-
st égale à la pression en F, augmentée du poids d'un cy-
liquide ayant pour hauteur EF, et pour base l'unité de
onc la pression en B est égale à la pression en F, aug-
poids du liquide que contiendraient deux cylindres ayant
pour base l'unité de surface, et pour hauteurs, l'un BD,
. En continuant de la même manière, et observant que
en M est nulle, on arrivera à trouver que la pression en B
a poids du liquide que contiendraient cinq cylindres, ayant
base l'unité de surface, et ayant pour hauteurs les lignes
H, IK, LM. Les pressions en A et B devant être égales,
te que la somme des cinq lignes BD, EF, GH, IK, LM,
gale à la ligne AC ; ou, en d'autres termes, les surfaces
liquide, dans les deux vases, doivent se trouver à une
ance verticale au-dessus du plan horizontal qui passe par
oints A et B. Donc, en définitive, ces surfaces libres doi-
situées sur un même plan horizontal.

eil représenté par la *fig.* 303 permet de vérifier très faci-
principe que nous venons de trouver. Cet appareil se com-
vase de verre muni inférieurement d'un tuyau horizontal,
ité duquel est adapté un tube de verre qui se relève verti-
Quand on verse de l'eau dans le vase, elle se répand en
s le tube de verre, en passant par le tuyau horizontal qui

le relie au vase; et il est aisé de reconnaître que les sur
sont à un même niveau AB, dans le tube et dans le vase
on enlève le tube de verre, pour le remplacer par un
d'une forme différente, *fig.* 304 ou 305; on voit que l

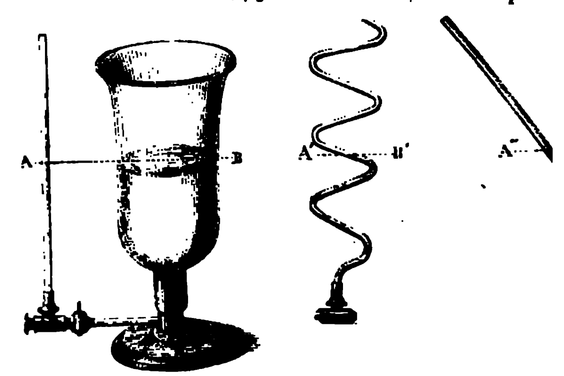


Fig. 303. Fig. 304.

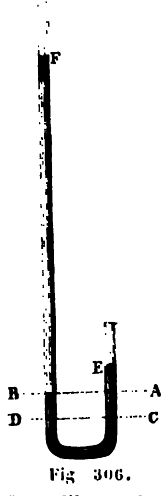


Fig 306.

l'eau A'B', ou A"B", est toujours si
prolongement de la surface libre du l
le vase. Un robinet, placé sur le tuy
tal, permet d'interrompre ou de ré
lonté la communication entre le vas
et facilite ainsi la substitution d'un
autre, sans qu'on ait besoin de vi
chaque fois

§ 229. Lorsque deux liquides de
férentes, et non susceptibles de se
introduits ensemble dans des vase
quants, les choses ne se passent pas
manière que dans le cas où il n'y a
liquide. Supposons, par exemple, qu
un tube de verre doublement recourb
et ouvert à ses deux extrémités, et
étant placé comme l'indique la figu
versé du mercure : ce liquide se rép
la partie horizontale et dans les deu
verticales, s'y sera mis en équilibre,
faces libres, dans ces deux branches, auront été au mê

ite versé de l'eau dans la branche de gauche, cette
ınt sur le mercure, a dû le faire passer en partie dans
droite, où son niveau se sera élevé. Mais, lorsque
établi, la surface libre de l'eau dans la branche de
trouve pas au même niveau que celle du mercure
he de droite ; ces deux surfaces doivent au contraire
des hauteurs très différentes, ainsi que nous allons le

examinons les pressions qui ont lieu, dans l'une et
ıe, sur le plan horizontal AB, qui passe par la sur-
ation des deux liquides. L'équilibre du mercure exige
ɔn soit la même pour tous les points situés sur un même
al CD inférieur à AB ; car s'il n'en était pas ainsi, le
du dans la portion du tube qui fait communiquer les
s serait inégalement pressé en des points situés sur
ın horizontal, ce qui est impossible. Cette égalité de
ır tous les points d'un plan horizontal quelconque CD,
ntre que du mercure dans les deux branches, aura en-
r celui de tous ces plans qui est le plus élevé, c'est-à-
plan AB. Il n'en serait plus de même pour un plan
périeur à AB, c'est-à-dire pour un plan qui rencontre-
ure dans la branche de droite, et de l'eau dans la bran-
ıe. Observons maintenant que la pression qui s'exerce
du plan AB, dans la branche de droite, est égale au
lindre de mercure qui aurait pour base l'unité de sur-
hauteur la distance verticale de la surface libre E du
lessus du plan AB ; et que, de même, la pression qui
n des points de ce plan, dans la branche de gauche, est
ls d'un cylindre d'eau ayant pour base l'unité de sur-
hauteur la distance verticale de la surface libre F de
ıus du même plan AB. Puisque ces pressions doivent
l en résulte que les poids des deux cylindres de mer-
doivent être égaux, ce qui ne peut avoir lieu qu'autant
ıurs de ces cylindres sont inversement proportionnelles
des liquides qu'ils contiennent. Ainsi, pour l'équilibre,
e la surface libre F de l'eau au-dessus du plan AB

liquides, au-dessus du plan horizontal qui passe par leur s
séparation, soient inversement proportionnelles aux densit
deux liquides.

§ 230. **Liquides soumis à des forces quelconques** molécules d'un liquide ne sont pas soumises à la seule ac pesanteur, outre les forces moléculaires qui existent tou circonstances qui accompagnent l'équilibre du liquide sera rentes de celles que nous avons trouvées jusqu'à présent. I sions ne varieront pas de la même manière, quand on d'un point à un autre de la masse liquide; la surface liquide n'aura pas la même forme. Occupons-nous spécial la surface libre, et voyons à quelles conditions elle devi faire.

Soit A, *fig.* 307, une molécule prise sur la surface libr quide soumis à des forces quelconques. C que nous avons composé en une seule t forces qui agissent sur cette molécule, n pris les forces moléculaires, et que la résul toutes ces forces soit dirigée suivant la li Si la portion de la surface libre du liq avoisine le point A, portion qu'on peut supposer plane, n'est pas perpendiculaire à AB, le liquide ne pourra pas être en é En effet, pour que le liquide fût en équ faudrait que la force dont nous venons de qui agit suivant la ligne AB, fût détruite par la résult actions moléculaires auxquelles la molécule A est soumis cette résultante des actions moléculaires est dirigée suivan pendiculaire AC à la surface libre (§ 219). Si donc la f agit suivant AB était décomposée en une force dirigée suiv et une autre force perpendiculaire à la première, la compo rigée suivant AC pourrait seule être détruite par l'action d moléculaires; et l'autre composante ferait nécessairement la molécule A, sur la surface libre, pour l'amener dans u position. Ainsi l'équilibre ne pourra pas exister, tant que tante des forces, auxquelles est soumise chaque molecule s la surface libre, ne sera pas dirigée perpendiculairemen surface. Si, au contraire, cette résultante est dirigée per lairement à la surface libre, on conçoit que l'équilibre pui lieu; puisque cette résultante, tendant à faire pénétrer la dans l'intérieur de la masse liquide, déterminera le dévelo de certaines forces moléculaires, dont l'ensemble pourra

B C

Fig. 307.

plètement à la production de ce mouvement, en donnant lieu à résultante égale et de sens contraire.

231. Nous pouvons donner, comme application de ce qui pré-, l'exemple d'un vase qui contient de l'eau, et qui est animé mouvement uniforme de rotation autour d'un axe vertical AB, 308. Le mouvement peut être communiqué au vase, comme le tre la figure, aide d'une velle C et ux poulies , dans la desquelles une corde fin. Pendant le mouvement, chaque cule du liquide est soumise d'une part poids, d'une autre part à force centrifuge dirigée horizontalement, et tendant à l'éloigner de l'axe AB.

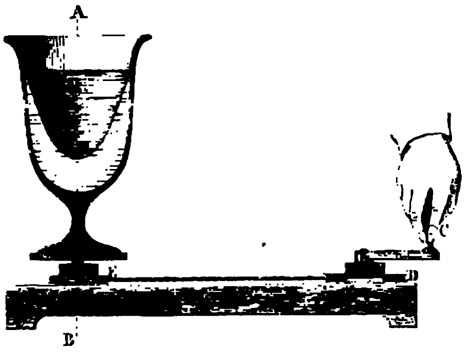


Fig. 308.

on compose ces deux forces en une seule, on trouvera une résultante oblique, située dans un plan passant par l'axe AB. Il faudra , pour l'équilibre du liquide, que sa surface libre ne reste plane et horizontale; mais qu'elle se déforme, comme l'indique la figure, afin qu'en chacun de ses points elle soit perpendiculaire à la résultante des deux forces appliquées à la molécule liquide y est située. La surface deviendra concave, par l'effet du mouvement de rotation, et sa concavité sera d'autant plus prononcée le mouvement sera plus rapide; la ligne courbe, suivant laquelle cette surface sera coupée par un plan quelconque passant par e AB, aura la forme d'une parabole (§ 104).

§ 232. La figure que présente la surface de la terre dans son ensemble, abstraction faite des aspérités du sol, est un autre exemple remarquable que l'on peut donner comme application du principe § 230. Tout porte à croire qu'à une époque très reculée, la masse ière de la terre était liquide, et que c'est par un refroidissement progressif que sa surface s'est solidifiée, et est ainsi parvenue l'état que nous lui *connaissons. Cette* masse liquide, si elle n'avait *été animée d'un mouvement de* rotation, aurait naturellement

pris la figure d'une sphère, en raison de l'attraction mu s'exerçait entre ses diverses molécules, et qui tendait à k cher le plus possible les unes des autres. Les matières li différentes densités qui en faisaient partie se seraient régulierement tout autour de son centre, en couches s concentriques : et la résultante de toutes les attractions a une molécule de la surface aurait été soumise, de la part molecules, aurait été dirigée perpendiculairement a cette puisqu'elle aurait nécessairement passé par le centre d masse. Mais le mouvement de rotation de la terre autour des pôles l'a empechée de prendre cette forme sphériqu en eff t qu'un pareil mouvement, en vertu duquel chaque p une circonférence de cercle dans l'espace d environ 24 heur lieu au développement d'une force centrifuge AB, *fig.* 3 chaque molécule non s l'axe de rotation PP'; c se compose avec la resul des attractions que la éprouve de la part de autres, et oblige ainsi la quide à prendre une aut que si la résultante AC seule. Si la surface était même que dans le cas où vement de rotation n'eût p la force AC aurait été vers le centre O, et la r AD des deux forces n aurait pas été dirigée centre : donc elle n'aura perpendiculaire a la surface libre du liquide, ce qui ne lieu Ainsi, par suite de l action des forces centrifuges, qu vement de rotation développe dans les diverses molecule tuées sur l'axe, la surface a dû s'aplatir dans le sens d des pôles, et se renfler dans le voisinage de l equateur, pou une forme telle que l indique la ligne ponctuée *mm*, tout gerant beaucoup.

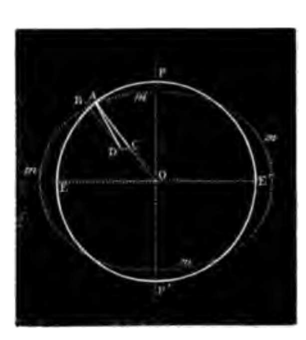


Fig. 309.

La surface de la terre s étant solidifiée peu à peu par le sement, la croûte solide qui s'est ainsi formée a conservé, dan semble, la figure aplatie qu'avait la surface lorsqu'elle eta *Quant* aux eaux de la mer, qui la recouvrent en grande pa sont dans les mêmes conditions que la masse liquide qu

mitivement la totalité du globe terrestre : la surface de ces eaux également aplatie vers les pôles, et renflée vers l'équateur. Si erre cessait de tourner autour de son axe, et que sa croûte solide hangeàt pas de forme, les eaux de la mer se retireraient du age de l'équateur, et viendraient s'accumuler vers les pôles, de se rapprocher de la figure sphérique.

233. La verticale, dont la direction est déterminée par le fil à b (§ 97), est la ligne suivant laquelle agit sur un corps la force nous avons nommée le *poids* de ce corps. Cette force est la ré- te des attractions que toutes les molécules de la terre exercent le corps, et de la force centrifuge à laquelle il est soumis en du mouvement de rotation de la terre. Il résulte de ce qui a dit dans le § 230, que la verticale doit être perpendiculaire à la ce des eaux tranquilles, en chaque point de cette surface. d nous avons dit que la surface libre d'un liquide pesant en bre devait être plane et horizontale (§§ 218 et 219), nous supposé implicitement que les verticales menées par les s points de cette surface pouvaient être regardées comme llèles entre elles. Si l'étendue de la surface du liquide est assez de pour qu'on ne puisse plus regarder les verticales menées ses différents points comme parallèles entre elles, on ne pourra dire que cette surface soit plane; mais on dira qu'elle est par- perpendiculaire à la verticale. C'est ainsi que la surface d'un présente une courbure tres sensible.

Si des causes extérieures venaient à faire varier la direction du à plomb en un même lieu, la direction de la surface des eaux quilles dans ce lieu varierait en conséquence. Or, c'est précisé- ent ce qui arrive tous les jours, par suite des attractions que le soleil et la lune exercent sur les corps placés à la surface de la terre. D'après les découvertes faites par Newton, deux corps placés dans l'espace, à telle distance qu'on voudra l'un de l'autre, s'attirent pro- portionnellement à leurs masses et en raison inverse du carré de leur distance. Le soleil et la lune attirent donc constamment vers eux le corps pesant qui est suspendu à l'extrémité inférieure d'un fil à plomb, tout aussi bien qu'ils attirent la terre. Ces attractions, combinées avec celles que ces deux astres exercent en même temps sur la terre, font que le fil à plomb ne se trouve pas dans les mêmes conditions que si ces astres n'existaient pas : la direction du fil à plomb est un peu différente de ce qu'elle serait, si le corps pesant suspendu au fil était soumis seulement à l'attraction de la terre, et à la force centrifuge qui résulte de son mouvement de rotation. Mais le soleil et la lune ne sont pas toujours placés de la même manière

par rapport au fil à plomb : tantôt ils sont situés tous deux à ou tous deux à l'occident ; tantôt ils se trouvent l'un d'un cô tre de l'autre : chacun de ces astres change constamment de dans l'espace d'une journée. Il en résulte que leur influen fil à plomb le fait dévier de sa direction naturelle, tantôt d' tantôt de l'autre, et cela périodiquement.

Les changements de direction qu'éprouve le fil à plomb verses heures d'une même journée, en vertu des actions dc venons de parler, sont tellement faibles, que l'observation attentive n'en ferait pas reconnaître directement l'existe surface des eaux tranquilles, qui doit toujours être perpend au fil à plomb, doit participer à ses oscillations : elle doi s'incliner dans un sens, tantôt s'incliner en sens contraire. Le de l'eau dans un lac doit, par exemple, s'élever et s'abaiss cessivement sur un de ses bords, tandis qu'il s'abaisse et s'é même temps sur le bord opposé. Mais ce mouvement d'osc de la surface de l'eau est encore presque insensible, quand sidère une petite étendue d'eau, telle qu'un lac ; et les mouv accidentels dus aux agitations de l'air s'opposent à ce que l'on en constater l'existence. Ce n'est que dans les grandes mers mouvement oscillatoire de la surface, correspondant aux cl ments périodiques de direction du fil à plomb, peut devenir tou sensible : c'est ce qui constitue le phénomène des *marées*. Sur les on voit la surface de la mer s'élever et s'abaisser successivemen fois dans l'espace d'environ 25 heures. Ces mouvements de de reflux sont dus aux changements d'inclinaison qu'éprouve p quement la surface de la mer, par suite des actions du soleil e lune sur le fil à plomb. Aux époques de pleine lune et de n lune, les effets de l'action simultanée des deux astres s'ajout c'est alors qu'ont lieu les grandes marées. Aux époques du p ou du dernier quartier, au contraire, les actions du soleil e lune se contrarient, et les marées sont beaucoup moins forte

§ 234. **Capillarité.** — Lorsqu'on examine attentivement l face de l'eau contenue dans un vase de verre, on reconn cette surface est bien plane dans presque toute son étendue que, tout près des parois du vase, elle se relève d'une maniè prononcée. Nous allons voir à quoi tient cette espèce d'ano qui semble être en contradiction avec ce que nous avons dit vement à la surface libre d'un liquide pesant.

Lorsque nous avons démontré (§ 249) que la surface libr liquide pesant doit être plane et horizontale, nous avons dit *résultante* des actions qu'une molécule, située à la surface, éq

e molécules voisines, était dirigée suivant une ligne laire à cette surface. Mais cela n'est vrai qu'autant que ule n'est pas très rapprochée de la paroi du vase qui liquide, et les conséquences que nous en avons déduites ctes que pour les points de la surface qui satisfont à cette

comment la proximité des parois peut influer sur la forme ce libre du liquide. Nous supposerons, pour cela, que la plane et horizontale jusqu'à la paroi même, *fig*. 310, et herons si le liquide peut être en conservant cette disposition. Soit pris sur la surface du liquide, tout aroi du vase. Décrivons autour du mme centre, une surface sphérique outes les molécules qui peuvent e action sur la molécule située en omprises à l'intérieur de cette sera ce que l'on nomme la *sphère*



Fig. 310.

o la molécule A. Si cette sphère ne comprenait que des iquides, on pourrait dire, comme nous l'avons fait (§ 219), n de la symétrie, la résultante des actions moléculaires à la molécule A est dirigée perpendiculairement à la surquide en ce point. Mais le point A étant situé très près de sa sphère d'activité pénètre dans la matière qui la comorte que la molécule A est soumise à la fois aux actions nnent des molécules liquides, et des molécules de la paroi sont comprises à l'intérieur de cette sphère. La symétrie ne plus, et l'on ne peut plus dire que la résultante des acculaires appliquées au point A soit perpendiculaire à la liquide, c'est-à-dire verticale, puisque nous avons supcette surface était horizontale.

ons que la portion de paroi qui est située dans la sphère du point A soit terminée par une face plane et verticale, quelle vient aboutir le liquide. Imaginons de plus que nous ne dans le liquide, à gauche du point A, un plan vertical à la face plane de la paroi dont nous venons de parler, placé d'ailleurs que le point A soit également distant de e ces deux plans. Le liquide contenu à l'intérieur de la activité du point A se trouvera divisé en deux portions actions moléculaires émanant de la portion *m* du liquide idemment une résultante verticale, à cause de la symétrie. *ortion n du liquide, et la portion* p de paroi, qui agissent

également sur la molécule A, donneront lieu à une résu
sera généralement oblique; et l'on conçoit que, selon la
liquide et celle de la paroi, cette résultante sera dirigée t
vant une ligne telle que AB, tantôt suivant une ligne tell
Dans l'un ou l'autre cas, la molécule A sera soumise : 1° à
qui est une force verticale; 2° à la résultante verticale de
moléculaires qui émanent de la partie *m* du liquide; 3° à
tante oblique des actions moléculaires qui viennent de la
du liquide, et de la portion *p* de la paroi. Elle ne pourra don
en équilibre, et par suite la surface du liquide ne restera
et horizontale. Si la troisième de ces forces est dirigée sui
ligne telle que AB, la molécule A glissera vers la paroi;
s'accumulera dans le voisinage de cette paroi, et sa surfa
lèvera, comme le montre la *fig* 311. Si cette troisième
dirigée suivant AC, la molécule A s'
de la paroi; le liquide semblera être
par elle, et sa surface s'abaissera, c
montre la *fig*. 312.



Fig. 311.

C'est le premier de ces deux cas q
sente, lorsqu'on met de l'eau dans un
verre. L'eau se relève vers les bords
pour ainsi dire s'attacher aux parois
sur lesquelles il en reste d'ailleurs un
adhérente, lorsqu'on retire l'eau du
cas se rencontre toutes les fois que l
contenu dans le vase en *mouille* les

On voit un exemple du second c
qu'on met du mercure dans un vase
La surface du mercure se déprime da
sinage des parois : et lorsqu'on ret
quide, elles n'en retiennent aucune
Cette dépression de la surface du liquide, dans les points



Fig. 312.

très rapproché de
se produit toutes
que ces parois ne
mouillées par le li

§ 235. Si l'on f
ger dans l'eau le
inférieures de de
de verre A, B, *fig*.
les faces sont ver
parallèles, la surface de l'eau se relèvera de part et

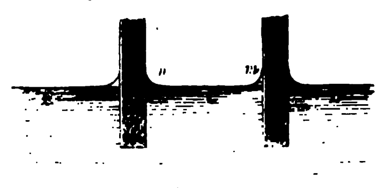


Fig. 313.

:es deux lames, conformément à ce que nous venons de
es deux lames sont convenablement éloignées l'une de
orme qu'affectera la surface du liquide, dans le voisi-
ne d'elles, ne sera nullement influencée par la présence de
e. Dans ce cas la surface sera plane et horizontale en C,
eux parties relevées *m*, *n*, et elle se trouvera au même
les autres parties D, E, de la surface, situées en dehors
ames. Mais si, par une cause quelconque, la surface C se
menée à un niveau plus élevé, le liquide monterait en
ue en *m*. Or, c'est ce qui arrivera, si l'on rapproche les
es, *fig*. 314, de telle manière qu'il n'y ait plus de portion



Fig. 314.



Fig. 315.

ce qui reste plane en C. La partie relevée *m*, se terminant
ement à une portion de surface qui est elle-même relevée
ion de la lame B, s'élèvera plus haut que quand elle abou-
la surface horizontale, qui s'étendait précédemment entre
lames de verre De même, la partie *n* s'élèvera plus haut
e s'élevait, et cela en raison de la présence de la partie re-
Ces deux espèces de talus liquides réagissent donc l'un
re, de manière à se maintenir dans des positions plus élevées
s qu'ils prenaient, lorsque les lames étaient plus éloignées :
int le plus bas C de la surface du liquide compris entre ce
e trouve placé au-dessus du niveau des parties extérieures
n conçoit que, si l'on rapproche encore les lames de verre
l'autre, *fig* 315, l'effet dont on vient de parler sera encore
noncé, c'est-à-dire que le liquide montera plus haut entre
lames. L'élévation du liquide, qui se produira dans de pa-
irconstances, sera d'autant plus grande que les lames seront
pprochées. C'est ce que l'on met bien en évidence, en détrui-
parallélisme des lames, et les faisant se toucher par un de
rds, de manière *que, tout en* restant verticales, elles for-
ntre elles un angle très-aigu, fig. 316 : on voit alors le liquide

lever dans l'espace angulaire qu'elles comprennent, e
utant plus qu'il est plus près de l'arête verticale suivant
elles se touchent, c'e
d'autant plus qu'il s
dans un espace plus
entre elles.

Fig. 316.

§ 236. Lorsque de l
nètre dans un tube
d'un très petit diamè
éprouve de la part de
du tube une action an
celle qu'elle éprouvait
part des deux lames d
entre lesquelles elle é
serrée. Cette action de
tend à maintenir le l
dans le tube, à un niveau supérieur à celui qu'il prendra
n'existait pas. C'est ainsi que, si l'on prend deux vases co
quants A, B, *fig*. 317, dont l'un, A, soit un tube de verre d
petit diamètre, l'eau que l'on introduira dans le vase B
dans le tube A jusqu'à un point très notablement plus él
l a surface libre qui
minera en B, tandis
surfaces libres, de
d'autre, devraient é
même niveau (§ 22
parois avec lesqu
liquide est en cont
gissaient pas de m
modifier ce résulta
Un phénomène a
mais inverse, se
lorsqu'on introduit
cure dans ces mêm

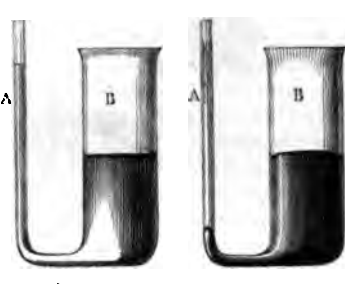


Fig. 317. Fig. 318.

communiquants, *fig*. 318. Le niveau du mercure, dans le tu
A, se maintient très notablement au-dessous de la surface l
tale qui le termine dans le vase B; tandis que, sans l'ac
nous examinons en ce moment, le niveau devrait être le n
part et d'autre.

Les tubes, d'un très petit diamètre, dans lesquels se pr
ces élévations ou dépressions de liquides, qui semblent en
diction avec les lois ordinaires de l'équilibre des liquides,

le *tubes capillaires;* ce nom vient de ce qu'on assimile leurs
ons intérieures à celles d'un cheveu. Par suite, on appelle
ité l'ensemble des phénomènes dont nous venons de nous
', qui se produisent au contact des liquides et des solides,
ont dus aux actions moléculaires qu'éprouvent des molé-
quides situées très près de ces corps solides. La capillarité
ı très grand rôle dans la nature. et pour n'en citer qu'un
ie, il suffit de dire qu'elle contribue beaucoup à l'ascension
ève dans les végétaux.

17. Transmission des pressions dans les gaz. —Les gaz
ent d'une propriété qui leur est commune avec les liquides: c'est
nde mobilité de leurs molécules, les unes par rapport aux au-
Mais il existe entre eux une différence essentielle. Une masse
e est presque incompressible: quelque grand que soit l'effort
lui applique, pour lui faire occuper un espace plus petit, la
ution de volume qui en résulte est à peine sensible. Une
e gazeuse, au contraire, cède facilement à l'action de l'effort
end à la comprimer: son volume se réduit à la moitié, au tiers,
uart de ce qu'il était précédemment, suivant que cet effort est
ou moins grand. Si ensuite l'effort disparait, le gaz reprend
volume primitif. De plus, si une masse gazeuze est contenue
un vase fermé, et que la capacité du vase vienne à s'accroître
e manière quelconque, le gaz se dilate aussitôt, pour occuper
l'espace qui lui est offert.

a plupart des résultats auxquels nous sommes parvenus, relati-
ent aux pressions dans les liquides, conviennent également aux
en raison de la mobilité des molécules, qui est commune aux
et aux autres. Mais la compressibilité et l'élasticité des gaz font
plusieurs de ces résultats ont besoin d'être modifiés, pour leur
applicables. Nous allons les passer en revue, afin d'indiquer en
i consistent ces modifications.

onsidérons d'abord une masse gazeuze, contenue dans un vase
né, et dont les diverses molécules ne soient soumises qu'à leurs
ons mutuelles. Ce gaz se trouvera dans les mêmes conditions que
iquide dont nous nous sommes occupés dans les paragraphes
à 210. Une seule différence devra être apportée aux considéra-
s employées alors, pour qu'elles puissent convenir à notre masse
euze. Dans le cas d'un liquide, on pouvait appliquer telle force
on voulait à l'un des pistons qui remplaçaient des portions de
oi: et l'équilibre pouvait toujours exister, pourvu que les forces
liquées aux autres *pistons* eussent un rapport convenable avec
remière. Dans le cas d'un gaz, au contraire, la force qui doit

être appliquée à chacun de ces pistons est entièrement dét[illegible]
par la force expansive du gaz. Si cette force n'était pas assez g[illegible]
le gaz repousserait le piston et sortirait : si elle était trop gra[illegible]
gaz se comprimerait, et le piston pénétrerait dans le vase. En [illegible]
compte de cette différence, due à la compressibilité et à l'é[illegible]
du gaz, et reprenant les raisonnements contenus dans les p[illegible]
phes 206 à 210, on arrivera aux conséquences suivantes.

1° Si une masse gazeuse est contenue dans un vase, et que [illegible]
pistons A, B, *fig.* 277 (page 314), ferment exactement deux ou[illegible]
tures pratiquées dans la paroi de ce vase, les forces qui devront [illegible]
appliquées à ces deux pistons, pour maintenir le gaz en équil[illegible]
seront entre elles comme les surfaces de ces deux pistons.

2° Si une masse gazeuse est contenue dans un vase fermé [illegible]
pressions que le gaz exerce sur diverses portions de la paroi du [illegible]
en vertu de sa force expansive, sont proportionnelles aux éte[illegible]
de ces portions de parois.

3° Si par un point A, pris à l'intérieur d'une masse gazeu[illegible]
équilibre, on mène différents plans, les pressions supportées [illegible]
ces plans, et rapportées à l'unité de surface, seront toutes ég[illegible]
entre elles : chacune de ces pressions sera ce que l'on nomme [illegible]
pression au point A. Elle sera la même que la pression supp[illegible]
par une portion quelconque de la paroi du vase, et rapportée à l'[illegible]
nité de surface.

§ 238. **Les gaz sont pesants.** — Nous avons supposé, dans [illegible]
qui précède, que les molécules gazeuses n'étaient soumises q[illegible]
leurs actions mutuelles : mais il n'en est jamais ainsi. Les gaz s[illegible]
pesants, tout aussi bien que les liquides ; et l'action de la pesa[illegible]
teur sur leurs molécules modifie les résultats que nous avons obt[illegible]
nus en n'en tenant pas compte.

Voyons d'abord comment on peut reconnaître qu'en effet les g[illegible]
sont pesants : car il n'est pas possible de s'en assurer de la mê[illegible]
manière que pour les corps solides ou liquides : quand on abando[illegible]
une masse gazeuze à elle-même, on ne la voit pas tomber com[illegible]
ces autres corps. L'expérience qui démontre que l'air, par exemp[illegible]
est pesant, est bien simple. On prend un grand ballon de verre [illegible]
fig. 319, dont le col est garni d'une monture de cuivre munie d'[illegible]
robinet B. Cette monture de cuivre porte en outre intérieurem[illegible]
un pas de vis, à l'aide duquel on peut fixer le ballon au cen[illegible]
de la platine d'une machine pneumatique, comme le montre [illegible]
fig. 319. Lorsque le ballon n'est pas fixé de cette manière, on p[illegible]
adapter à sa monture de cuivre, à l'aide du même pas de vis, [illegible]
petit crochet C, qui sert à le suspendre au-dessous du plateau d'[illegible]

ce, *fig*. 320. Le robi-
étant ouvert, et par
le ballon étant plein
, on visse le crochet
la monture ; puis,
avoir suspendu le
au plateau de la ba-
e, on établit l'équili-
en mettant des poids
l'autre plateau. Cela
on dévisse le crochet
n adapte le ballon à
machine pneumatique.
319, et en maintenant
ours le robinet B ou-
t, on fait agir cette
hine. L'air sort du
lon en quantité de plus
plus grande, à mesure
la machine fonc-
ne Lorsqu'il n'en reste
que très peu, on
me le robinet B, on dé-
he le ballon de la ma-
ne pneumatique, on
adapte de nouveau le
chet C, et on le sus-
nd comme précédem-
ent au plateau de la ba-
ce. On voit alors que
poids qui avaient été
is dans le second pla-
au, pour faire équilibre
ballon, lorsqu'il était
ein d'air, se trouvent
op forts pour lui faire
core équilibre, après
ue l'air en a été retiré
n grande partie. Pour
tablir l'équilibre, on est
bligé de mettre un cer-
tin poids *sur le plateau qui supporte* le ballon ; ce poids est évi-

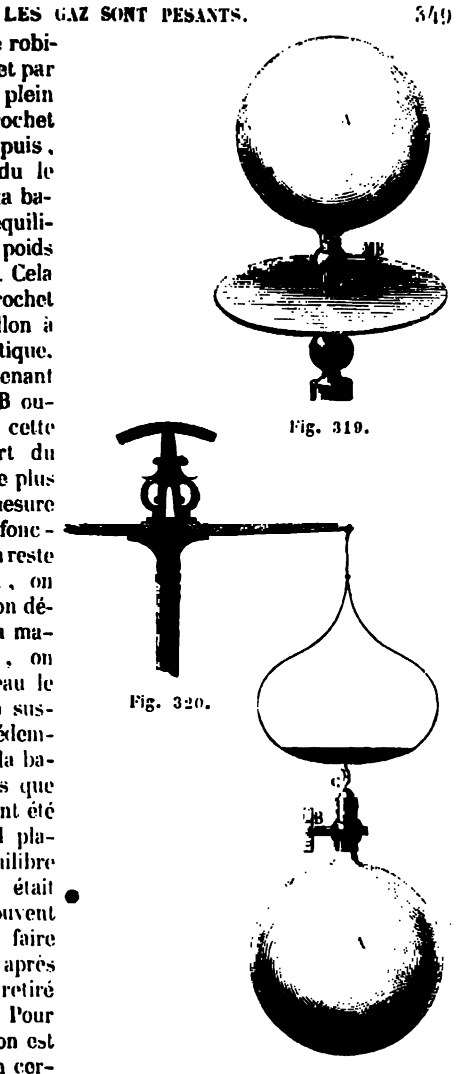


Fig. 319.

Fig. 320.

demment le poids de l'air qu'on a fait sortir du ballon. L'ai
pesant. Il en est de même de tous les autres gaz, pour le
peut faire une expérience analogue, mais qui présente
difficultés de plus.

§ 239. **Pressions dans les gaz pesants.** — En appli
gaz les raisonnements qui ont été faits sur les liquides pesa
les paragraphes 211 à 216, et tenant compte de la comp
et de l'élasticité des gaz, on arrivera aux résultats suivan

1° Dans une masse gazeuse pesante en équilibre, les
supportées par de très petites portions de plans, d'égale
passant toutes par un même point A pris à l'intérieur du
égales entre elles. La pression totale que supporterait l
surface de chacun de ces plans, si cette surface était press
comme elle l'est dans le voisinage du point A, constitue c
nomme la pression au point A.

2° Dans une masse gazeuse pesante en équilibre, la pr
la même pour tous les points situés sur un même plan h

3° La pression en un point d'une masse gazeuse pesant
libre est égale à la pression en un autre point situé plus
le premier, augmentée du poids du gaz que contiendrait un
vertical, compris entre les plans horizontaux qui passe
deux points, et ayant pour base l'unité de surface.

4° La pression exercée par un gaz pesant en équilib
point de la paroi du vase qui le contient, est égale à
exerce en un autre point de cette paroi, situé plus ha
premier, augmentée du poids du gaz que contiendrait un
vertical, compris entre les plans horizontaux qui passent pa
points, et ayant pour base l'unité de surface.

Le poids de l'unité de volume d'un gaz est tellement fa
tivement aux pressions que ce gaz exerce habituellement
de sa force expansive, contre les surfaces avec lesquelle
contact, que la plupart du temps, quand on n'a pas à
une masse gazeuse très étendue, on peut faire abstractio
de ses molécules. Alors le gaz rentre dans les conditio
l'avions supposé placé dans le § 237, et les résultats que
énoncés dans ce paragraphe deviennent applicables.

§ 240. L'incompressibilité presque absolue des liquid
de regarder les diverses parties d'une masse liquide
équilibre comme ayant la même densité. Il n'en est pas ri
ment ainsi : puisque, les parties inférieures du liquide éta
tement pressées que les parties supérieures, les molécul
être plus rapprochées dans les premières que dans les

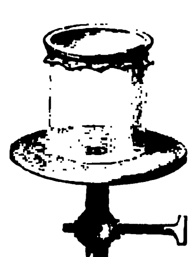
[redacted]

›lume doit comprendre un plus grand nombre de molé-
les, à mesure que ce volume est pris plus bas dans la
le. Mais la différence est tellement faible, que l'on ne com-
rreur sensible, en admettant que les molécules sont égale-
iées les unes des autres dans toute l'étendue de la masse
en d'autres termes, que la densité est la même partout.
st pas de même des gaz. Leur grande compressibilité fait
; légère différence de pression, entre deux points d'une
euse en équilibre, détermine une différence appréciable
nsités du gaz en ces deux points : la densité est d'autant
e que la pression est plus forte. Aussi, dans une masse
sante en équilibre, la densité va-t-elle constamment en
depuis la partie supérieure jusqu'à la partie inférieure.
ı étant la même pour tous les points situés sur un même
ıntal, la densité doit également être la même pour ces di-
. Si l'on imagine que toute la masse gazeuse soit divisée
ıs, par un grand nombre de plans horizontaux, menés à
distance très petite les uns des autres, on pourra regar-
ité comme étant la même dans toute l'étendue de chacune
ıches ; la densité ira au contraire en augmentant, quand
. d'une tranche à une autre située au-dessous de la pre-
masse gazeuse pourra ainsi être assimilée à un ensemble
; pesants de densités différentes, qui se superposent dans
ase, et qui sont séparés les uns des autres par des surfaces
ıorizontales.

on dit (§ 239) que la différence des pressions en deux
ne masse gazeuse pesante en équilibre, est égale au poids
e contiendrait un cylindre vertical compris entre les plans
ıx qui passent par ces deux points, et ayant pour base
surface, on doit entendre que le gaz contenu dans ce cy-
t pris tel qu'il est dans la masse gazeuse, entre les deux
comprennent ce cylindre ; sa densité doit décroître con-
t de la base inférieure du cylindre à sa base supérieure.
ut donc pas avoir le poids d'un pareil cylindre de gaz,
il s'agissait d'un liquide, en multipliant le poids de l'unité de
u gaz par le volume du cylindre (§ 220). Mais quand il s'a-
différence de hauteur qui n'est pas bien grande, comme la
u gaz ne varie pas beaucoup dans cette hauteur, on peut
e poids du cylindre gazeux, en admettant que la densité
ême dans toute son étendue, et opérant comme s'il s'agis-
liquide ; l'erreur commise ainsi sera inappréciable dans la
es cas.

exerce une pression sur la surface de tout corps avec leq
en contact. Il résulte de ce qui précède que cette pression, r
à l'unité de surface, est égale au poids de l'air que contien
cylindre vertical, ayant pour base cette unité de surface, et
dant dans toute la hauteur de l'atmosphère. Elle s'exerce d
aussi bien sur les corps placés à l'intérieur d'une chambre,
ceux qui sont en plein air : car il existe toujours des comm
tions de l'intérieur de la chambre au dehors, par les chemin
les joints des portes et des fenêtres, et la pression de l'atm
se transmet avec toute son intensité de l'extérieur à l'in
Nous allons indiquer quelques expériences qui mettent en
la pression atmosphérique, et qui peuvent donner une id
grandeur.

On prend un cylindre creux de verre, *fig.* 321, dont on
une des bases à l'aide d'une peau d
que l'on fixe solidement sur son cont
place ce cylindre sur la platine d'une
pneumatique, de manière à établir un
intime entre la surface de cette platin
bords de la seconde base du cylindre,
été préalablement usés pour satisfaire
condition. Si alors on retire l'air de l'i
du cylindre de verre, en faisant ma
machine, on voit que la peau de v
déforme ; de plane qu'elle était, elle
concave. Avant qu'on ait placé le
sur la machine pneumatique, la pe
également pressée, sur ses deux faces, par l'air atmosphér
s'étendait librement de l'une à l'autre. Mais, dès qu'on a re
partie de l'air qui était à l'intérieur du cylindre, l'air restant
çant plus une si grande pression que précédemment sur
inférieure de la peau, la pression supérieure n'est plus
balancée : la peau fléchit sous cette pression, qui, à mesure
vide s'opère, approche de plus en plus d'être égale au poi
colonne d'air, qui aurait pour base l'ouverture du cylindre
s'élèverait jusqu'à la limite de l'atmosphère. Lorsque la p
ainsi fortement tendue sous le poids considérable qu'elle su
il suffit de la toucher légèrement avec un corps solide, pour
se déchire avec fracas, en laissant rentrer l'air dans l'esp
l'on avait fait le vide.


Fig. 321.

Une autre expérience consiste à rapprocher l'un de l'autr
hémisphères creux de bronze, *fig.* 322, de manière à étal

entre leurs bords, et à faire le vide dans l'espace intérieur. Pour cela, l'un des deux hémisphères est duit, dont l'extrémité est garnent d'un filet de vis, à l'aide t le fixer au centre de la plachine pneumatique. On ma.chine ; l'air contenu à l'intéx hémisphères sort par le con l on juge que le vide est suffié, on ferme un robinet adapté atin d'empêcher que l'air ne l on aura détaché les hémia machine pneumatique. Si che à séparer les deux hémide l'autre, on éprouve une ulté ; ils sont comme collés ce n'est qu'en leur appliquant onsidérable qu'on peut parisjoindre. Avant qu'on eût fait le vide, chaque hémiégalement pressé par l'air, intérieurement et extérieurequand le vide a été opéré, les pressions intérieures ayant a près complétement, les presures produisent tout leur effet; ent fortement les deux hémi contre l'autre, et l'on ne peut qu'en exerçant sur chacun rces de traction capables de pressions. Cette expérience a ée par Otto de Guéricke, e de Magdebourg, inventeur nine pneumatique ; c'est pour n que les deux hémisphères servent à la faire, portent le *isphères de Magdebourg*.

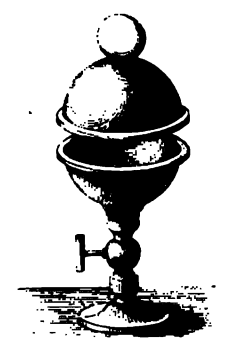


Fig. 322.

liquerons enfin une troisième que tout le monde peut réla plus grande facilité. On verre à boire, qu'on remplit ent d'eau : puis on le recouvre le de papier, et on le retourne sens dessus dessous, oin de soutenir le papier avec le plat de la main, pen-ouvement, pour le maintenir en contact avec les bords

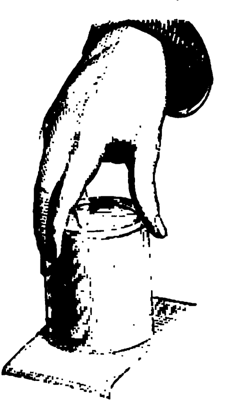


Fig. 323.

du verre. Lorsque le verre est retourné, et que la feuille de est dans une position bien horizontale, on retire la main qui tenait : on voit alors le liquide se maintenir dans le verre tomber, *fig.* 323, et la feuille de papier reste adhérente aux du verre, comme si elle y était collée. Si l'eau ne tomb c'est que la pression atmosphérique la soutient, en agissant en haut, sur la face inférieure de la feuille de papier. Cette est nécessaire pour faire l'expérience : sans elle, la pression qui ne s'exercerait jamais avec une parfaite régularité sur surface inférieure de la masse d'eau, déterminerait une dé tion de cette surface, et tandis que l'air monterait d'un côté tomberait de l'autre côté.

§ 244. **Baromètre.** — Supposons que l'on introduise une de verre dans un baquet plein d'eau, en la couchant sur pour qu'elle se remplisse, et qu'il ne reste pas d'air à so rieur ; puis qu'on la retire en partie de l'eau, en la plaçant nière que son ouverture, tournée vers le bas, reste tout au-dessous de la surface du dans le baquet, *fig.* 324, o que, dans cette nouvell tion, la cloche restera tement pleine d'eau. Les physiciens, qui regarda fait comme étant en op avec le principe de l'équilil liquide dans des vases co quants (§ 228), l'expliqua disant que la nature a *hor vide.* On voit, en effet, que tion de la cloche qui est sus de la surface de l'e le baquet serait vide de si l'eau s'y abaissait jusq veau de cette surface, l'air ne pourrait nullemen nétrer.



Fig. ·24.

C'est la pression atmosphérique, s'exerçant sur la surface dans le baquet, qui s'oppose à ce que l'eau de la cloche d pour se mettre de niveau avec cette surface. S'il n'y avai pression appliquée à l'eau du baquet, le principe de l'équilil liquide dans des vases communiquants exigerait bien que le de l'eau fût le même à l'intérieur et à l'extérieur de la cloch

[redacted]

sphérique modifie ce résultat, en obligeant le liquide
a cloche, au-dessus du
ndrait sans elle.
:ependant que la pres-
que ne peut faire ainsi
ie jusqu'à une certaine
:loche avait des dimen-
extrêmement grandes,
ıtiendrait pas dans toute
:lle s'abaisserait jusqu'à
:nce de niveau, à l'inté-
térieur, fût en rapport
ır de la pression qui en
i, au lieu de prendre de
un liquide plus dense,
: niveau déterminée par
ɪression extérieure sera
l'autant plus petite que
ɪuide sera plus considé-
résultat peut-il être vé-
ıent à l'aide du mercure.
rend un tube de verre
r un bout, et ayant une
ron 90 centimètres ; on
plétement de mercure,
t le doigt sur l'extrémité
renverse en plongeant
émité dans un vase con-
ure. Si alors on enlève
ɪpêchait le mercure du
ɪniquer avec celui du
ıaintienne le tube verti-
nière que la plus grande
ɪueur se trouve au-des
e libre du mercure dans
ınait que le tube ne reste
ent rempli. Le liquide
intérieur, en laissant un
dessus de lui, et il s'ar-
où la différence de ni-
ıbe et dans le vase est
ntimètres, fig. 325

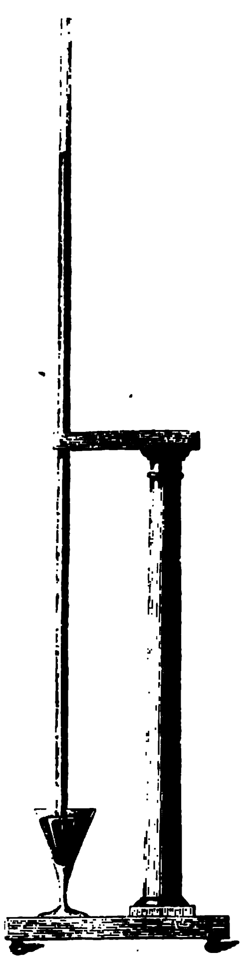


Fig. 325.



à celle qui est exercée au même niveau, à l'intérieur d la colonne de mercure située au-dessus de ce niveau. que l'atmosphère exerce sur 1 centimètre carré de la s du mercure dans le vase sera donc égale au poids d'un mercure ayant pour base 1 centimetre carré, et pour centimètres. Le volume de ce cylindre est de 76 centim et comme le centimetre cube de mercure pèse 13^{gr},6, i que la pression exercée par l'atmosphère sur 1 centi est de 1 033 grammes, ou 1^{k},033.

Il est aisé de voir maintenant jusqu'à quelle hauteur maintenue par la pression atmosphérique, dans une exp logue à la précédente, dans laquelle on remplacerait le l'eau. Le cylindre d'eau dont le poids mesurerait dans c sion atmosphérique, devant peser autant que le cylin cure dont nous venons de parler, les hauteurs de ces d seront inversement proportionnelles aux densités des leur correspondent : en sorte que la hauteur du cylindr égale à 0^{m},76 × 13,6 ou bien égale à 10^{m},33. La diff veau de l'eau, à l'intérieur du tube et à l'extérieur, da rience faite comme celle que nous venons d'indiquer, de 10^{m},33.

Si l'on répète l'expérience de Torricelli, à diverses é

égale à celle qu'exercerait une colonne de mercure de iteur, on dit que cette pression est d'*une atmosphère.* est de 2, de 3, de 4,... atmosphères, si elle équivaut sulterait d'une colonne de mercure ayant une hauteur fois, 4 fois,... 0^m,76. Le mot *atmosphère* est employé, pour désigner une pression que l'on prend pour terme son, et qui constitue ainsi une unité particulière, à l'aide ine pression quelconque pourra être évaluée en nombre. rappeler qu'une pareille pression d'une atmosphère est ar centimètre carré.

.'appareil représenté par la *fig.* 325, que l'on opérant comme nous l'avons dit, et qui fournit de la pression atmosphérique, se nomme un On obtient encore un baromètre, en prenant un par un bout, et dont l'autre bout est recourbé, emplissant ce tube de mercure, puis le retour- le placer comme l'indique la figure, l'extrémité s le haut. Aussitôt que le tube est retourné, nercure baisser dans la grande branche, jus- s l'équilibre soit établi, entre la pression at- ie, qui s'exerce sur la surface libre du mer- a petite branche, et la pression due à la colonne située dans la grande branche, au-dessus de ce libre. Ce baromètre, *fig.* 326, est désigné m de *barometre à siphon*, à cause de la forme a partie inférieure; celui de la *fig.* 325 est un *à cuvette.*

igements qu'éprouve, d'un moment à un autre, e de niveau des surfaces libres du mercure dans re, se traduisent par un mouvement de chacune c surfaces. Lorsque cette différence de niveau, mine la hauteur de la colonne barométrique, menter, le mercure monte dans le tube, et la cuvette, ou dans la petite branche ouverte lace dans le baromètre à siphon; si la hauteur de arométrique diminue, le mercure descend dans le tube, et la cuvette. La somme des deux déplacements que pren- n sens contraire les deux surfaces libres du mercure est uantité dont la hauteur de la colonne barométrique aug- iminue; mais ces déplacements peuvent être très différents tre, suivant que les deux surfaces libres auront des étendues *ins grandes, l'une par* rapport à l'autre. Supposons que

Fig. 326.

le tube barométrique soit peu large dans l'endroi
trémité supérieure de la colonne de mercure, et
cuvette permette à la surface libre du liquide qu
cuper une assez grande étendue; un abaissemen
le tube ne fera passer dans la cuvette qu'une


Fig. 327.

liquide qui, se
une étendue
grande, ne fera
libre dans la c
hauteur insigni
surfaces libres,
dans la cuvette,
due, l'une d'ell
qûe l'autre mo
surface libre ét
grande dans le
cuvette, un abai
du mercure dan
nerait une élévat
grande dans la

Les variations
teur de la colo
ayant un certai
changements d
du baromètre u
tiné à indiquer
pose à devenir
Dans ce but, on
lement le baro
fig. 326, et l'on
branche ouverte
de cuvette, un di
que celui du tube
les changement
la colonne baro
lieu à des déplace
ciables de la sur
tube; et cette sur
tion d'index, vien
dre aux diverse
l'on a marquées d'avance à côté du tube.

Pour rendre plus visible la variation qu'éprou

ımétrique, on a imaginé le *baromètre à cadran*, dans angements de niveau du mercure dans la petite branche nent lieu au mouvement d'une aiguille sur un cadran, ı28. Voici quelle est la disposition de cet appareil. Une ıble gorge est fixée à un petit axe horizontal elle peut tourner très facilement. Deux petits ivoire sont suspendus aux extrémités de deux acun est attaché en un point de l'une des deux ı poulie ; ces deux fils, enroulés en sens con- e l'autre dans les deux gorges, descendent en- alement, et sont tendus par les poids des deux 'ivoire. Un de ces deux cylindres, plus lourd , pénètre à l'intérieur de la petite branche du et vient reposer sur la surface du mercure qui nu. Si le mercure s'abaisse dans la petite bran- ite d'une augmentation de la hauteur baromé- etit cylindre d'ivoire qui se trouve dans cette 'étant plus soutenu par le liquide, s'abaisse en faisant tourner la poulie, et faisant en même ter l'autre cylindre d'ivoire. Mais si le mercure la petite branche, il soulève le cylindre d'ivoire nonte, l'autre cylindre descend, et la poulie tourne en aire. Une aiguille, fixée à l'extrémité de l'axe de la ment avec elle, et vient correspondre successivement es indications que porte un cadran concentrique avec L'aiguille doit être construite de manière à avoir son gravité sur l'axe de la poulie, afin que son poids ne à faire tourner cet axe dans un sens plutôt que dans un

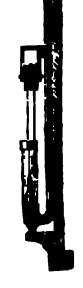


Fig. 328.

D'après les notions générales que nous avons données nent sur l'atmosphère de la terre (§ 242), il est bien évi- si l'on transporte un baromètre en des points de plus en ; dans cette atmosphère, la hauteur de la colonne baro- levra diminuer, en raison de la diminution progressive ons. L'expérience en a été faite pour la première fois, à n de Pascal, en 1648 ; un baromètre ayant été transporte ı sommet du Puy-de-Dôme, la hauteur de la colonne ba- e a éprouvé une diminution de 84 millimètres. Le raccour- de la colonne barométrique étant d'autant plus grand que ; à laquelle on s'est élevé est plus considérable, on con- bservation du baromètre, faite en divers points, puisse faire *les différences de niveau de* ces points. C'est ce qui arrive

en effet; et c'est sur ces considérations qu'est basée la ı
la hauteur des montagnes par le baromètre.

Dans les circonstances ordinaires de température et d
atmosphérique, au niveau de la mer, l'air pèse environ
moins que l'eau, et par conséquent 10 472 fois moins qu
cure, à égalité de volume. D'après cela, si l'on s'élève
ment de 10^m,472, la pression atmosphérique devant dir
poids d'une colonne d'air de 10^m,472 de hauteur, la coloı
métrique diminue d'une quantité 10 472 fois plus petite, c'
d'un millimètre. Une élévation verticale de 1^m seulemen
lieu à une diminution d'environ un dixième de millimètr
colonne de mercure, quantité qui est appréciable. Si l'ai
même densité à toutes les hauteurs, rien ne serait plus si
de mesurer la différence de niveau de deux points, à l'aid
romètre : en supposant que la densité de l'air fût celle
d'être indiquée, on n'aurait qu'à multiplier 10^m,472 par l
de millimètres dont la colonne barométrique aurait diminu
sant du premier point au second. Mais il n'en est pas ainsi.
sité de l'air décroît progressivement, à mesure qu'on s'él
l'atmosphère ; et pour trouver une même diminution de
barométrique, il faut monter de quantités de plus en plus
à mesure qu'on est déjà plus élevé au-dessus du niveau d
Une dépression d'un dixième de millimètre dans la colonne
cure, qui correspond à une élévation d'environ 1^m dans
phère, au niveau de la mer, ne correspond plus bientôt
élévation de 2^m, de 3^m, de 4^m.... De plus, la températur
d'une couche d'air à une autre couche, les densités de ces
ne sont pas les mêmes que si la température était unifor
toute l'atmosphère. D'autres circonstances encore vienne
pliquer la question. Cependant on est parvenu à construire d
d'un usage commode, à l'aide desquelles on détermine ass
tement la différence de niveau de deux points, par des obs
de pressions barométriques et de températures, faites en
points. Ces tables sont publiées tous les ans dans l'*Ann*
bureau des longitudes.

§ 248. Le baromètre a besoin d'être disposé d'une manière
pour se prêter à l'usage que nous venons d'indiquer ; il faut
facile à transporter, et qu'il permette de déterminer bien ex
la différence de niveau des deux surfaces libres du mercu
quelle est la disposition du baromètre de Fortin, qui a été
de manière à satisfaire à ces deux conditions.

Ce baromètre peut être suspendu à la partie supérieure



·, *fig.* 329 ; on le met
tion, quand on veut
vation. Lorsque les
du pied sont rappro-
ère à se toucher, elles
intérieur un espace
el le baromètre peut
rte que le pied, étant
ne sorte de fourreau
tir l'instrument pen-
.
e de Fortin est à cu-
ne nous l'avons dit,
au du mercure monte
is le tube, il descend
même temps dans la
ur avoir une mesure
gement qu'a éprouvé
la colonne barométri-
ir compte à la fois de
ngements simultanés
ais ici le fond de la
oile : il est formé d'une
t le milieu est appuyé
d'une vis
n faisant
is, dans
s l'autre,
a position
cuvette,
e niveau
'elle con-
a donc de
te dispo-
mener la
a mercure
e à être
incidence
e l'échelle
accompa-
pour que
le la co-

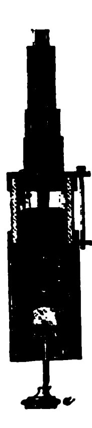


Fig. 330.



Fig. 329.

lonne barométrique soient représentées tout entières par l
gements de niveau du mercure dans le tube. Pour facilit
ration, la cuvette est munie d'une pointe d'ivoire *b*, qui
exactement au niveau du zéro de l'échelle. On s'assure que l
libre du mercure est bien au niveau de ce zéro, en examin
pointe d'ivoire, et son image produite par la réflexion de
lumineux sur la surface du mercure; la pointe et son imag
se toucher, sans que la réflexion de la lumière sur la su
liquide indique la moindre dénivellation de cette surface a
de la pointe d'ivoire.

Pour déterminer le point de l'échelle métallique gradué
correspond le niveau du mercure dans le tube, on se sert c
seur *c*, *fig.* 329, qui présente deux ouvertures opposées
lesquelles on observe le mercure dans le tube. On abaiss
seur jusqu'à ce que le rayon visuel qui rase les bords s
de ces deux ouvertures vienne toucher le sommet de la c
mercure. Un point de repère et un vernier, tracés sur ce
permettent de trouver, sur l'échelle graduée, la valeur n
de la hauteur de la colonne barométrique, et cela avec une
mation d'un dixième de millimètre.

Pour que le résultat obtenu de cette manière soit bien
est indispensable que le tube barométrique soit exactement
car s'il était oblique, l'espace qui y serait occupé par le me
rait une longueur plus grande que ce qu'on nomme la hau
colonne barométrique. Cette hauteur est la distance ver
sépare les plans horizontaux menés par les deux surfaces
mercure, dans le tube, et dans la cuvette. Aussi le baro
Fortin se suspend-il au pied qui le supporte, de manière
prendre très facilement la position verticale que tend à l
l'action de la pesanteur. Deux petites vis *m*, *m*, *fig.* 331
à fixer la monture métallique du tube
pièce de petit manchon *n* qu'elle traver
tourillons *o*, *o*, adaptés au manchon *n*
un axe autour duquel le baromètre pe
dans une certaine direction; ces touril
sent dans deux ouvertures d'un anne
peut lui-même tourner librement auto
autres tourillons *q*, formant un seco
direction perpendiculaire au premier
de ces deux axes de suspension, le l
peut prendre telle direction que l'on ve

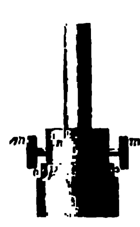


Fig. 331.

ner; et cédant à l'action de son poids, il se place vert

[redacted]

fil à plomb. Les petites tiges de fer, *f*, *f*, *fig*. 329, qui ›chées aux trois branches du pied, de manière à les ux à deux, sont destinées à maintenir ces branches positions relatives invariables, pendant qu'on fait l'ob-, et à prévenir ainsi les inconvénients qui pourraient l'un dérangement brusque et accidentel de l'une des

'omètre de Gay-Lussac est destiné à atteindre le même but de Fortin. C'est un baromètre à siphon, dans lequel les faces libres du mercure, ayant la même étendue, se dépla-nême temps de quantités égales, en sens contraire ; on a ›in de tenir compte des changements de niveau dans les deux ; du baromètre, afin d'en déduire la variation totale de la barométrique. Des dispositions particulières, dans le détail es nous n'entrerons pas, permettent d'ailleurs de trans-rès facilement l'instrument, sans qu'il se dérange.

). **Loi de Mariotte.** — Lorsque l'on comprime un gaz, sa istique augmente ; les pressions qu'il exerce sur les diverses : de la paroi qui l'enveloppe croissent à mesure que son vo-minue. Mariotte, en étudiant les changements correspon-ᵌ pression et de volume, a reconnu l'existence de la loi sui-qui porte son nom : *La force élastique d'une masse de gaz ı température reste la même varie en raison inverse du qu'elle occupe*. La condition que la température de la masse qu'on considère reste la même, est essentielle, et ne doit pas ssée sous silence. On observe en effet que, lorsqu'on dimi-ısquement le volume d'une masse gazeuse, sa température : lorsqu'au contraire on permet à cette masse gazeuse de se sa température s'abaisse. Pour que les forces élastiques que ı successivement une même masse gazeuse, dont on fera va-volume, satisfassent à la loi de Mariotte, il est donc néces-ue ces forces élastiques ne soient mesurées qu'après que le ra eu le temps de reprendre la température qu'il avait d'a-'n se mettant en équilibre de température avec les corps qui ›nnent.

loi de Mariotte se vérifie facilement de la manière suivante. nd un tube recourbé, *fig*. 332, dont la petite branche est fer-ır le haut, tandis que la grande branche est ouverte, et l'on ıit, vers la partie inférieure de ce tube, une petite quantité :cure, que l'on dispose de telle manière qu'il s'élève dans les ranches à un même niveau *ab*. La masse d'air, qui se trouve *nfermée dans la petite* branche, supporte la même pression

que l'air extérieur; car le mercure ne peut être en équilib position indiquée, qu'autant qu'il est soumis à des pressio sur ses deux surfaces libres vient alors à verser du mercu grande branche, l'équilibre est le mercure monte dans la petite en comprimant l'air qu'elle mais il monte beaucoup plu grande. Il s'établit ainsi un no libre; et comme le mercure doit lement pressé, dans les deux b sur le plan horizontal *cd* qui la plus basse de ses deux surfac il en résulte que la pression ex l'air qui est renfermé dans la pe che est égale à la pression de térieur qui s'exerce librement grande branche, augmentée d sion due à la colonne de me existe dans cette branche au-d plan horizontal *cd*. En com nouveau volume occupé par d'air qui est emprisonnée dan branche, avec le volume qu'ell sous la pression atmosphériqu ve que ces deux volumes sont inverse des pressions corresp Ainsi, lorsque le mercure s'es manière à réduire ce volum moitié, ce qu'on reconnait à l'a visions tracées à côté de la pe



Fig. 332.

che, la différence de niveau du mercure dans les deux br égale à la hauteur de la colonne barométrique: le gaz supp une pression double de la pression atmosphérique. Lorsq lume de la masse d'air n'avait été réduit qu'aux deux ti qu'il était primitivement, la différence de niveau du mer les deux branches était égale à la moitié de la hauteur de l barométrique; le gaz supportait alors une pression égale et demie la pression atmosphérique.

Des expériences nombreuses ont été faites dans le but d l'exactitude de la loi de Mariotte, pour l'air atmosphériq divers autres gaz. Les plus récentes, et en même temps le

sont celles de M. Regnault. Ces expériences, dans lesquelles
essions ont été poussées jusqu'à 28 atmosphères, ont fait voir
la loi de Mariotte n'est pas rigoureusement exacte ; elle est
t inexacte pour des pressions qui approchent de celles pour
lles les gaz soumis à l'expérience passent à l'état de liquides.
s différences qui existent entre les volumes que prend suc-
ment une même masse de gaz soumise à diverses pressions,
volumes qu'elle devrait prendre d'après la loi de Mariotte, sont
ent petites, qu'on peut regarder cette loi comme exacte, sans
ésulte d'erreurs appréciables dans les applications à la mé-
e pratique.

50. **Dilatation des gaz. — Loi de Gay-Lussac.** — Lors-
n fait varier la température d'une masse gazeuse, il se produit
ets différents, suivant les circonstances dans lesquelles le gaz
ve placé. S'il est libre d'augmenter ou de diminuer de vo-
sans que la pression qu'il supporte de la part de ses parois
une élévation de température le dilatera ; un abaissement de
ature le contractera ; le changement de température déter-
t un changement de volume sans changement de force élasti-
i, au contraire, le gaz est contenu dans une enveloppe fermée
sceptible de changer de grandeur, une élévation de tempé-
augmentera sa force élastique, et un abaissement la dimi-

second résultat est une conséquence du premier. On voit en
que, lorsqu'une masse de gaz passe d'une température à une
plus élevée, sans changer de volume, on peut concevoir qu'elle
d'abord dilatée par l'effet de la chaleur, sans que sa force élas-
ait varié ; puis qu'elle ait été ramenée à son volume primitif,
nservant la nouvelle température qui lui avait été donnée, ce
traîne une augmentation de force élastique. La loi de Mariotte
indique que, dans cette partie de l'opération, la force élastique
z s'accroît dans le rapport de son volume réduit au volume
vait avant d'éprouver cette contraction ; ou bien encore dans
pport du volume primitif de la masse gazeuse, au volume que
donné l'élévation de sa température lorsque sa force élastique
angeait pas. On peut donc en conclure que, si par l'effet d'une
e élévation de température, une masse gazeuse se dilate sans
ger de pression, ou bien augmente de force élastique sans chan-
le volume, son volume s'accroît, dans le premier cas, dans le
e rapport que sa force élastique dans le second : si, dans
emier cas, le *volume du gaz augmente* de la moitié, du tiers,
uart.... de ce qu'il était d'abord, dans le second cas la force

élastique augmentera de la moitié, du tiers, du quart,
valeur primitive.

En étudiant la dilatation des gaz, sous pression consta
Lussac a trouvé qu'à égalité de changement de tempéra
dilatation était la même pour tous les gaz ; qu'elle ne dép
de leur nature. C'est en cela que consiste la *loi de Gay-L*

M. Regnault, ayant fait des expériences nombreuses et
cises sur la dilatation des gaz, a reconnu que la loi de Ga
n'était pas rigoureusement exacte. Tous les gaz ne se di
de la même quantité, pour un même accroissement de tem
Mais nous pouvons répéter, pour la loi de Gay-Lussac, ce
avons dit de la loi de Mariotte : en la regardant comme
n'en résultera aucune erreur appréciable dans les applica
mécanique pratique.

D'après les expériences de M. Regnault, lorsque la te
d'une masse d'air augmente d'un degré, sans que sa force
change, son volume s'accroît des $\frac{11}{3000}$ de ce qu'il était à
rature de 0°, ou de la glace fondante. Nous regarderons c
comme s'appliquant à toute espèce de gaz, en raison c
nous venons de dire. Si, par exemple, le gaz que l'on
avait un volume de 3000 litres à la température de 0°, so
serait de 3011 litres à la température de 1°, de 3022 litres
pérature de 2°, de 3110 litres à la température de 10°,
litres à la température de 100°. Il résulte de là que, si l
rature d'un gaz augmente d'un degré, sans que son volum
sa force élastique s'accroît des $\frac{11}{3000}$ de ce qu'elle était à l
rature de 0° ; cette force élastique s'accroîtra du double, du
de cette quantité, si la température augmente de 2°, de 3

§ 251. **Influence de la pression atmosphérique résultats relatifs à l'équilibre des liquides.** — Dans to
nous avons dit précédemment (§§ 218 à 236), pour des liqu
minés par des surfaces libres, nous avons supposé qu'aucune
ne s'exerçait sur ces surfaces. Les résultats auxquels nous
arrivés ne sont donc pas applicables aux liquides, tels qu'il
sentent habituellement à nous, puisque les surfaces libre
liquides sont ordinairement soumises à la pression atmosp
Nous allons passer en revue ces divers résultats, afin de fa
naître ceux qui restent exacts, et d'indiquer les modificat
doivent être apportées aux autres, en raison des pressions
mosphère exerce sur les surfaces libres des liquides.

1° Si un liquide pesant est en équilibre dans un vase, e
surface libre ne soit soumise à aucune pression, cette su



et horizontale (§ 218). L'atmosphère venant à presser égale-
sur les divers points de cette surface libre, l'équilibre ne sera
nment pas troublé : donc la surface libre d'un liquide pesant
uilibre est plane et horizontale, lors même que cette surface
umise à la pression atmosphérique.

Dans le cas où la surface libre d'un liquide pesant en équilibre
umise à la pression atmosphérique, la pression en un point
masse liquide, ou en un point de la paroi du vase qui le con-
, n'est plus égale seulement au poids d'un cylindre du liquide,
urait pour base l'unité de surface et pour hauteur la distance
cale de ce point à la surface libre (§ 220); elle est égale à ce
s, augmenté de la pression que l'atmosphère exerce sur l'unité
urface.

• Si l'on veut déterminer la pression supportée par une surface
e certaine étendue, contre laquelle un liquide pesant vient s'ap-
er, ainsi que nous l'avons fait dans le § 222, on devra tenir
pte de la pression atmosphérique, qui s'exerce sur la surface
e du liquide, et qui se transmet, sans changer de grandeur, à la
oi que l'on considère, pour s'ajouter à la pression qui résulte du
ds du liquide. La pression totale sera ainsi augmentée, et le
tre de pression n'occupera plus la même place que dans le cas
la surface libre du liquide n'éprouvait aucune pression. Mais sup-
sons que l'on veuille déterminer la pression totale supportée par
paroi, ainsi que le centre de pression, afin de savoir quelle force
doit appliquer à cette paroi, et en quel point on doit l'appliquer,
ur empêcher la paroi de céder à l'action du liquide, on devra
rs raisonner comme si la pression atmosphérique n'existait pas,
le résultat auquel on sera conduit sera bien celui qu'on cherche.
ur si la pression atmosphérique, agissant sur la surface libre du
uide, se transmet, sans changer de grandeur, à la portion de paroi
e l'on considère, d'une autre part elle agit avec la même inten-
é sur la face opposée de cette portion de paroi. Ces deux pres-
ns égales et contraires se détruisent donc mutuellement, et les
oses se passent de la même manière que si l'atmosphère n'exer-
t aucune pression ni d'un côté ni de l'autre. Ainsi, ce que nous
ons trouvé relativement à la pression supportée par une paroi rec-
gulaire (§ 222), est encore exact, en tant que la recherche avait
ur objet de trouver la grandeur et le point d'application de la
ce qui devait être appliquée à cette paroi, pour vaincre la pous-
e du liquide.

4° Des remarques analogues doivent être faites relativement à ce
e *nous avons dit dans les paragraphes* 223 à 226. Les pressions



de liquide ayant pour base l'unité de surface, et pour l
et que, de même, la pression en B est égale à la pressio
rique qui s'exerce en M, augmentée du poids du liqui
tiendraient cinq cylindres, ayant tous pour base l'unit
et dont les hauteurs seraient BD, EF, GH, IK, LM. Do
les pressions en A et en B soient égales, il faut que la
soit égale à la somme des hauteurs BD, EF, GH, IK, I
en d'autres termes, que les points C et M soient situés s
plan horizontal.

6° Lorsque deux vases communiquants contiendront d
de différentes densités, et que leurs surfaces libres seron
la pression atmosphérique, on trouvera encore, comme d
graphe 229, que les hauteurs de ces surfaces libres, a
plan horizontal qui passe par leur surface de séparation,
inversement proportionnelles aux densités des deux liqu

7° Enfin, dans tout ce que nous avons dit relativeme
face libre d'un liquide soumis à des forces quelconqu
relativement aux phénomènes capillaires, la pression atn
n'apporte aucune modification aux divers résultats au
avons été conduits. En effet, cette pression s'exerce t
chaque point de la surface libre d'un liquide, suivant u
perpendiculaire à cette surface. Si nous composons la p

52. Vases communiquants, avec pressions inégales sur surfaces libres.—Lorsqu'un liquide est en équilibre dans des communiquants, et que ses surfaces libres ne sont soumises a pression, ou bien qu'elles supportent la pression atmosphérique gissant également dans tous leurs points, ces surfaces libres t être à un même niveau (§§ 228 et 251). Mais il n'en est e même dans le cas où les surfaces libres du liquide, dans les communiquants, sont en contact avec des gaz dont les forces ques sont différentes; les pressions exercées par ces gaz, sur rfaces libres du liquide, étant inégales, il en résulte que ces ces ne peuvent plus se maintenir au même niveau. La surface s pressée s'abaissera au-dessous de l'autre.

ous en avons déjà eu un exemple dans l'appareil qui nous a à vérifier l'exactitude de la loi de Mariotte, *fig.* 332 (page 366). s avoir versé du mercure dans la grande branche, de manière mprimer l'air contenu dans la petite branche, nous avons ob- é que les surfaces libres du mercure devaient se trouver a des eurs différentes, et que la différence de hauteur de ces surfaces respondait à la différence des pressions supportées par elles, de art de l'atmosphère, et de l'air emprisonné dans la petite bran- . Il suffit de répéter le raisonnement que nous avons fait alors. r en conclure en général que *la différence de niveau des surfaces res d'un liquide, dans deux vases communiquants, est égale à la teur d'un cylindre du liquide considéré, qui aurait pour base l'unité surface, et dont le poids serait égal à la différence des pressions rcées sur ces deux surfaces libres, et rapportées à l'unité de rface.*

Si la pression est de 400 grammes par centimètre carré sur l'une s surfaces libres du liquide, de 250 grammes par centimètre carré r l'autre surface, et que le liquide soit de l'eau, la différence de veau de ces deux surfaces sera de $1^m,50$; parce qu'un cylindre eau, dont la base est d'un centimètre carré doit avoir une hau- ur de $1^m,50$, pour que son poids soit de 150 grammes. Si, le quide étant toujours de l'eau, les pressions sur ses deux surfaces bres sont, d'une part de $\frac{1}{2}$ atmosphère, et d'une autre part de atmosphères, la première surface se trouvera à $25^m,82$ au-des- us de la seconde: car, pour que le poids d'un cylindre d'eau, yant pour base un centimètre carré, pèse deux fois et demie ,033 (§ 245), ou bien $2^k,582$, il faut qu'il ait une hauteur de $25^m,82$.

§ 253. Supposons qu'on introduise l'une des extrémités d'un tube le verre *dans un vase qui contient* de l'eau, puis qu'appliquant la

bouche à l'autre extrémité du tube, on aspire l'air qui y est
on voit aussitôt l'eau monter dans le tube, et monter d'a
haut qu'on aura aspiré plus fortement. Ce phénomène est
séquence du principe énoncé dans le paragraphe qui préc
qu'on applique la bouche à l'extrémité du tube, de maniè
cepter toute communication de l'intérieur de ce tube avec l'
l'air qui y est contenu communique librement avec celui
dans la bouche et dans les poumons, et forme avec lui
d'air isolée, contenue dans une enveloppe fermée de tou
L'aspiration consiste dans une dilatation de l'espace occu
poumons. Cette dilatation produisant une augmentation d
de l'enveloppe qui renferme notre masse d'air, et cet air
dant dans la totalité de l'espace qui lui est offert, il en r
diminution correspondante dans sa force élastique. La pre
l'air du tube exerce sur la surface de l'eau avec laquell
contact, devient donc plus faible qu'elle n'était précé
c'est-à-dire plus faible que la pression atmosphérique: et co
dernière pression agit toujours avec la même intensité à l'ex
tube, il s'ensuit que la surface libre de l'eau est moin
dans le tube que dehors. C'est ce qui détermine une élé
liquide à l'intérieur du tube, élévation qui sera d'autant
noncée, que la différence des pressions sur les surfaces l
plus grande, c'est-à-dire que l'aspiration sera plus forte.

L'aspiration, produite avec la bouche, ne peut jamais fai
l'eau bien haut dans le tube. Mais si, au lieu de cela, on
tube, supposé très long, en communication avec une mach
matique, de manière à en retirer progressivement des p
plus en plus grandes de l'air qu'il contient, on verrait l'ea
de plus en plus. Il faut observer cependant que l'ascension
produite ainsi par aspiration, ne peut pas dépasser une
limite. La différence des pressions sur les surfaces libres d
à l'intérieur et à l'extérieur du tube, ne peut jamais sur
pression atmosphérique, puisque la plus grande de ces de
sions est la pression atmosphérique elle-même. La diffé
niveau de l'eau, occasionnée par cette différence des pres
peut donc pas être plus grande que la hauteur d'une colo
capable de faire équilibre à la pression atmosphérique, tel
a lieu au moment de l'expérience. Si, à ce moment, la col
rométrique a une hauteur de $0^m,76$, l'eau ne pourra pas
dans le tube à plus de $10^m,33$ au-dessus du niveau ext
l'expérience se faisait sur une haute montagne, où la haut
colonne barométrique fût beaucoup moindre, la limite que

[redacted]

sser l'élévation de l'eau par aspiration serait de beau-
ire à 10m,33.

au lieu d'aspirer l'air qui est en contact avec l'une des
es d'une masse d'eau contenue dans des vases communi-
ugmente la force élastique de cet air, en le comprimant
ère quelconque, on déterminera une dénivellation en
ire ; la surface libre soumise ainsi à une pression plus
écédemment s'abaissera, et l'autre s'élèvera d'une quan-
ondante. Si, par exemple, une caisse fermée A, *fig.* 333,
l'eau qui peut passer librement
'au B, adapté à la caisse près de
les surfaces de l'eau dans la
ans le tuyau se trouveront au
au, tant que les pressions sup-
ces surfaces seront égales. Mais
sion atmosphérique s'exerçant
sur l'eau du tuyau B, on intro-
la caisse A, par le tuyau C, des
l'air de plus en plus grandes,
oyens dont nous parlerons plus
rce élastique de cet air croîtra
nt ; la pression qu'il exercera
le la caisse deviendra de plus en plus grande, et l'eau
e plus en plus dans le tuyau B. La différence de niveau
ans le tuyau et dans la caisse, est ici déterminée par
ce entre la pression de l'air en A et la pression at-
e qui agit en B ; et comme la première de ces deux
eut croître indéfiniment, il en résulte que la hauteur à
au pourra s'élever ainsi dans le tuyau B est également
a hauteur de la surface de l'eau dans le tuyau B, au-des-
urface de l'eau dans la caisse A, sera égale à autant de
3 que l'excès de la pression de l'air en A sur la pression
que contiendra d'atmosphères (§ 245).



Fig. 333.

s important d'observer la différence essentielle qui existe
ation de l'eau par aspiration, et l'élévation par com-
ans le premier cas, l'eau ne peut pas s'élever à une hau-
rande que celle d'une colonne d'eau qui ferait équilibre
n atmosphérique ; tandis que, dans le second cas, elle peut
ne hauteur aussi grande qu'on veut.

Encrier siphoïde.—Pour qu'un encrier conserve bien
il contient, il est nécessaire que ce liquide ne soit en
ation directe avec l'atmosphère que par une surface de

petite étendue, afin de diminuer autant que possible
qui a lieu sur cette surface, et de diminuer aussi la
poussière qui y tombe pour se mêler à l'encre et l'é
atteindre ce but, on a imaginé diverses formes d'encr
lons examiner les deux principaux, ceux qui sont le p
depuis quelques années : ce sont l'*encrier siphoïd*
pompe.

L'encrier siphoïde, représenté par la *fig.* 334, est
quel on donne ordinairem
d'un tronc de cône ou d'un
ramide, et qui est fermé de
excepté vers le bas, où il
ouverture garnie d'une tub
qui a été introduite dans c
n'en remplit pas habituelle
capacité, est surmontée d
quantité d'air ; elle se re
dans la tubulure, où elle s



Fig. 334.

certain niveau. Le niveau de l'encre étant plus élevé
de l'encrier que dans la tubulure, il en résulte que la
que de l'air qui est enfermé au-dessus de l'encre doit
plus petite que celle de l'air atmosphérique. A mes
prend de l'encre, en introduisant la plume dans la tul
veau du liquide s'y abaisse. La différence du niveau à
à l'extérieur devenant plus grande, l'équilibre est trou
abaissement de la surface libre du liquide dans l'enc
pagné d'une élévation correspondante du niveau dans
et d'une dilatation de l'air qui surmonte la première s
blit cet équilibre : mais cette élévation du niveau dan
est plus faible que l'abaissement qui avait été produit
tité d'encre qu'on y avait prise. Ainsi en puisant de
la tubulure, on fait baisser en même temps les deux su
du liquide, et l'on détermine une dilatation de l'air inte
ne peut avoir lieu qu'autant que le niveau inférieur s
que l'autre. La surface libre de l'encre dans la tubulur
ainsi progressivement, finit bientôt par atteindre l'o
laquelle cette tubulure communique avec l'intérieur de
si l'on continue à prendre de l'encre, une bulle d'air
le vase, traverse le liquide, et vient se mêler à l'air qui
La masse d'air intérieure étant ainsi augmentée, sa fo
s'accroît brusquement ; le niveau de l'encre baisse à l
monte à l'extérieur, jusqu'à ce que l'équilibre se rétab

quantités d'encre étant enlevées de la tubulure, le niveau aissera, comme précédemment, jusqu'à ce qu'une nouvelle d'air pénètre à l'intérieur, pour faire remonter le niveau dans ulure, et ainsi de suite. Tandis que la position du niveau ex-r de l'encre descend et monte successivement, le niveau in-ir s'abaisse, au contraire, constamment ; il descend faiblement ant qu'on puise de l'encre dans la tubulure, mais il descend ut au moment où une bulle de l'air extérieur pénètre à l'inté-de l'encrier.

tte disposition satisfait parfaitement à la condition indiquée haut, qu'il n'y ait qu'une petite surface du liquide en commu-tion directe avec l'atmosphère. Mais elle présente deux incon-ents. Le premier consiste en ce que le niveau de l'encre varie la tubulure, de telle sorte qu'à certains moments, il est plus ile d'y puiser l'encre qu'à d'autres moments. Le second in-rénient, qui est le plus grave, consiste en ce que, si la tempé-re de l'air qui est renfermé à l'intérieur de l'encrier vient à croître, sa force élastique augmentera (§ 250), le niveau s'abais-à l'intérieur et s'élèvera dans la tubulure, et il pourra en ré-er qu'une certaine quantité d'encre soit répandue au dehors. t ce qui arrivera notamment, si l'encrier a séjourné dans un où la température est basse, et qu'on le transporte dans un autre où la température est plus élevée ; c'est ce qui aura encore lieu encrier, posé sur une table, près d'une fenêtre, vient à recevoir rayons du soleil.

§ 256. **Encrier pompe.** — ncrier pompe, représenté par fig. 335, se compose, comme crier siphoïde, d'une sorte de ervoir qui communique à un go-latéral par une ouverture. Mais y a cette différence que l'air i surmonte l'encre dans le ré-voir a toujours la même force stique que l'air atmosphérique; ouvercle qui ferme ce réservoir a partie supérieure ne le ferme s assez hermétiquement pour 'il n'y ait pas toujours libre com-unication entre l'air intérieur l'air *extérieur. L'encre qui est tenue dans l'encrier se répand* donc dans le réservoir et dans le



Fig. 335.

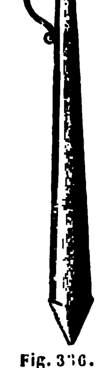


tout autour de lui. Ce cylindre, suspendu à une tige
l'intérieur est taraudé en forme d'écrou, peut s'élever c
au moyen d'une vis qui pénètre dans cet écrou, et do
saillie au-dessus du couvercle du réservoir. En faisa
bouton qui termine cette vis, on fait monter ou desc
lindre; il plonge alors plus ou moins dans l'encre du
détermine ainsi une élévation ou un abaissement de so
se fait sentir aussi bien à l'extérieur qu'à l'intérieur.

L'encre du réservoir n'est pas ici, comme dans l'enc
entièrement soustraite au contact de l'air atmosphéri
désavantage est faible : car, d'une part, le couvercle e
n'y tombe de poussière; et, d'une autre part, la
liquide dans le réservoir étant de petite étendue, p
resserrée entre les parois de ce réservoir et le contou
plongeur, l'évaporation ne doit y être que très faible
côté, le couvercle du réservoir, tout en ne fermant pas
ment, empêche qu'il ne se produise trop facilement des
d'air, qui renouvelleraient constamment celui qui
liquide, et activeraient ainsi beaucoup l'évaporation.

Cette dernière considération nous conduit naturel
conséquence importante. Lorsqu'on cesse de se servir
pompe, on doit faire tourner le bouton de manière
niveau de l'encre, et à la faire ainsi rentrer du godet

rument nommé *tâte-vin*, *fig.* 336. C'est un tube de ferblanc, s dimensions transversales, augmentant d'abord progressive-lepuis le haut jusque près de l'extrémité inférieure, uent ensuite brusquement, de manière à ne laisser à extrémité inférieure qu'une très petite ouverture. se servir de cet instrument, on l'introduit dans le au par la bonde, en l'enfonçant assez pour qu'il pé-dans le liquide. Ses deux extrémités étant ouvertes, pénètre à son intérieur, et s'y élève jusqu'au ni-extérieur. On met alors le pouce sur l'ouverture ieure, afin de la fermer, et d'intercepter ainsi toute nunication de l'air qui s'y trouve encore avec l'at-hère : puis on retire l'instrument. A mesure que le vin sort du liquide que contient le tonneau, le niveau in baisse à son intérieur, et par suite l'air qui le sur-te se dilate, la pression exercée par cet air devenant faible que la pression atmosphérique, le niveau du à l'intérieur de l'instrument ne s'abaisse pas jusqu'au au extérieur : le vin y est soutenu à un niveau plus é, par l'excès de la pression atmosphérique sur la sion de l'air intérieur. Ainsi, tant que l'instrument plonge ore dans le vin du tonneau, la surface du liquide qui est à intérieur s'éloigne de plus en plus du haut du tube, à mesure on élève l'instrument, puisque l'air qui le surmonte se dilate : is cette surface s'élève en même temps de plus en plus au-sus de la surface du vin du tonneau. Enfin, au moment où ifice inférieur est sur le point de sortir du liquide, une cer-ne quantité de vin est contenue dans le tube. Si l'on soulève da-ntage l'instrument, il conservera cette quantité de vin à son inté-eur, sans qu'il en sorte une goutte. Cela tient à ce que la pression mosphérique, s'exerçant librement par l'ouverture inférieure du be, fait équilibre au poids de la colonne de vin qu'il renferme, à la pression qui provient de l'air dilaté situé au-dessus de ce n. Le liquide est soutenu par la pression atmosphérique, comme tait l'eau contenue dans le verre renversé du paragraphe 243 ig. 323, p. 355). La feuille de papier qui recouvrait l'ouverture verre, dans cette expérience, n'est plus nécessaire ici, à cause la petitesse de l'orifice inférieur du tube ; cet orifice ne permet-ait pas à l'air de passer dans une portion de son étendue, pendant ue le vin coulerait dans la portion restante.


Fig. 336.

Quand on a retiré le tâte-vin du tonneau, il suffit de le porter au-sus d'un vase, et de retirer le pouce qui fermait l'orifice supé-

rieur, pour que tout le vin qu'il contient coule dans ce communication établie ainsi entre l'air de l'intérieur de l'im et l'air extérieur détermine une compression de cet air i qui reprend ainsi une force élastique égale à celle de l'air at rique ; et le vin, qui n'est plus soutenu par la différence d sions qu'il supporte en haut et en bas, s'écoule complétem

§ 258. **Moyen d'obtenir un niveau constant pour un contenu dans un vase.** — Supposons qu'on veuille ent une hauteur constante le niveau d'un liquide contenu dans niveau qui tend à baisser, soit par suite d'un écoulement d par un orifice inférieur, soit par suite de l'évaporation qui duit à sa surface, on pourra employer le moyen suivant, se sert notamment dans les opérations chimiques, lorsqu'o trer une assez grande quantité de liquide. Au-dessus du v lequel on veut entretenir un niveau constant, *fig.* 337 (ic est un entonnoir qui contient un papier), on dispose un autre vase et à étroite ouverture : ce second v d'avance rempli du liquide qui d peu à peu dans le premier vase, po placer celui qui en sera sorti. L'ori second vase est placé précisément teur à laquelle on veut entretenir dans le premier. Le liquide qu'il ne communiquant pas librement a mosphère par sa partie supérieure pas s'écouler, tant que l'orifice plonge d'une petite quantité dans du premier vase. Ce liquide est par la pression atmosphérique, qui met par l'orifice inférieur du va n'est pas entièrement vaincue pa sion provenant de l'air dont le li surmonté, en raison de la dilatatio suite de la diminution de force que cet air a éprouvée tout d'ab choses se passent ici exactem même manière que dans l'encrier (§ 255). Lorsque le niveau du liquide baisse dans le vase i et découvre ainsi l'orifice du vase supérieur, une bulle d'ai par cet orifice, monte dans le haut du vase, et une portio dante de liquide passe du vase supérieur dans le vas

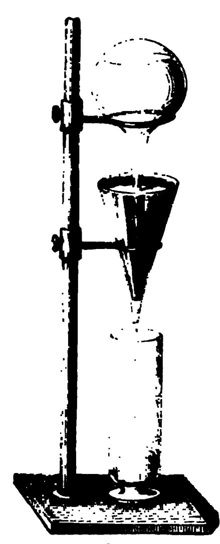


Fig. 337.

lu liquide se trouve ainsi relevé dans le vase inférieur. se encore, il va livrer passage à une nouvelle bulle d'air, ɜra dans le vase supérieur, pour en faire sortir une nou- ıité de liquide, et ainsi de suite. Le niveau est ainsi en- une hauteur constante dans le vase inférieur, tant que ıe contient encore une portion du liquide qui y avait été ɹout d'abord.

Tubes de sûreté. — Le jeu des tubes de sûreté, que l'on ɹvent aux appareils, dans les opérations chimiques, peut nent compris, à l'aide des principes qui précèdent. Ces t employés pour éviter les accidents qui pourraient ré- ce que la force élastique du gaz contenu dans l'appareil ɔ différente de celle de l'air atmosphérique. Si cette force devenait trop considérable, elle pourrait donner lieu à une ; si elle était trop faible, il en résulterait une sorte d'aspi- ferait monter à l'intérieur de l'appareil les liquides avec l est en communication, ce qui pourrait encore donner graves accidents. Pour se mettre à l'abri de ces accidents, ɜ, sur une des parties de l'appareil, un tube double- ourbé, *fig.* 338, dont la branche du milieu présente nent, et dont l'extrémité supérieure s'évase ıoir ; et l'on introduit dans ce tube une petite l'un liquide, soit de l'eau, soit du mercure. ɜ intercepte la communication qui existait ıt dans toute la longueur du tube recourbé : ui est contenu dans l'appareil, pénétrant par : du tube, jusque dans le réservoir *b*, ne peut ɪandre dans l'atmosphère, en s'échappant par ; du tube. Si la force élastique du gaz inté- t précisément égale à celle de l'air atmos- les surfaces libres du liquide se trouveraient niveau, dans le réservoir *b* et dans le ais s'il y a excès de l'une de ces deux forces ı sur l'autre, elle fera baisser la surface libre ˈ sur laquelle elle agit, l'autre surface mon- nème temps ; et la différence de niveau de surfaces sera d'autant plus grande qu'il y de différence entre les forces élastiques à r et à l'extérieur. Dans le cas où le gaz intérieur ac- ɹne trop forte tension, le liquide serait chassé de la boule ɹjeté *au dehors par le tube c* ; alors la communication ɓlie *dans toute la longueur* du tube de sûreté, le gaz



Fig. 338.

intérieur pourrait se répandre dans l'atmosphère, en le t
et sa force élastique diminuerait promptement. Dans l
contraire, où la diminution de tension à l'intérieur de
pourrait donner lieu à une *absorption*, tout le liquide
dans la boule *b*, et des bulles d'air, traversant ce liq
difficulté, à cause de la largeur de l'espace qu'il occ
draient les unes après les autres pénétrer dans l'appareil
a, ce qui élèverait assez promptement la force élastique
y est contenu, pour qu'il ne se produisît rien de fâcheux.

§ 260. **Manomètres.** — Pour mesurer la force élast
gaz contenu dans une enveloppe fermée, on emploie des
auxquels on donne le nom de *manomètres*. On divise ces
en deux espèces bien distinctes : les *manomètres à air l*
manomètres à air comprimé.

Un manomètre à air libre est un tube doublement rec
tièrement analogue au tube de sûreté dont nous venons
il n'y a de différence que dans la longueur de la branche c
qui est généralement beaucoup plus grande dans un r
que dans un tube de sûreté. L'excès de la force élastique
celle de l'air atmosphérique détermine une ascension
(qui est ici du mercure) dans la branche *c* ; et le rapport
entre la différence de niveau de ces deux surfaces libres
teur de la colonne barométrique fait connaître le nombre
phères dont se compose l'excès de force élastique que l'o
surer. D'après cela, si la différence de niveau du mer
le manomètre est de 0^m,76, la pression exercée par le
2 atmosphères ; si cette différence de niveau est de 2 fois
pression du gaz est de 3 atmosphères, et ainsi de suite. U
graduée est disposée à côté de la branche dans laquelle l
du gaz fait monter le mercure ; et la graduation est fai
nière à indiquer immédiatement la valeur de cette press
mosphères et dixièmes d'atmosphère, d'après la position
la surface libre du mercure le long de l'échelle.

§ 261. La disposition du manomètre à air comprimé
gue à celle du manomètre à air libre ; mais la branche *c*,
dans laquelle la pression du gaz fait monter le mercure,
à sa partie supérieure, au lieu d'être ouverte comme da
nomètre à air libre. La présence d'une certaine quant
emprisonnée dans cette branche fermée *c*, fait que le me
peut pas y monter d'une aussi grande hauteur, pour u
pression du gaz dans la branche *ab* ; car, à mesure que le
monte en *c*, l'air dont il est surmonté se comprime, et sa

[redacted]

avec la différence de niveau du mercure dans les à faire équilibre à la pression que le gaz exerce emple, l'air contenu en *c* est réduit à moitié du volume qu'il occupait sous la hérique, sa force élastique sera double it ; la pression exercée en *b* sera donc s, plus la fraction d'atmosphère que ifférence de niveau du mercure en *b* *c* est gradué d'avance, de manière à mmédiatement la force élastique du gaz après la position que cette force élas- e à l'extrémité de la colonne de mercure

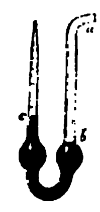


Fig. 339.

anomètre à air comprimé indique toujours exacte- istique du gaz avec lequel il est mis en communi- ue la température de l'air emprisonné dans le tube reste toujours la même que celle qu'il avait lorsqu'on reil. Nous avons vu, en effet (§ 250), que les chan- pérature influent d'une manière très notable sur la l'une masse de gaz qui conserve un même volume. omètre à air comprimé fonctionne à des tempéra- e celle à laquelle il a été gradué, il peut fournir une acte de la force élastique qu'il est destiné à mesurer.

ressibilité des liquides. — Lorsque l'on soumet pression une certaine quantité d'un liquide contenu oppe fermée, le liquide éprouve une diminution de ellement petite, que l'on a douté pendant longtemps éellement, et c'est de là que les liquides ont reçu *s incompressibles*. Dans les expériences qui ont été nnaître si les liquides étaient compressibles, le pis- n exerçait une pression sur une portion de la sur- marchait bien d'une certaine quantité dans le sens ui lui était appliquée, il pénétrait bien un peu a nveloppe fermée qui contenait le liquide : mais cette rente du volume du liquide pouvait être unique- tension des parois de l'enveloppe, produite par la n qu'elles éprouvaient de la part du liquide. On ne à un résultat concluant qu'en s'opposant à cette parois, à l'aide d'une pression appliquée sur elles , et capable de faire équilibre à la pression inté- *nsi que Œrsted fut* conduit à employer l'appareil *piézomètre*.

Un réservoir de verre *a*, *fig*. 310, est fermé de toutes p
vue à sa partie supérieure, où il est muni d'un tube *b* d
diamètre. On remplit d'eau le réser
tube, en ayant soin d'introduire e
temps, dans ce tube, une petite qu
mercure destiné à servir d'index. L
ensuite placé à l'intérieur d'un vas
lement de verre, que l'on remplit c
ment d'eau. Un piston B ferme exact
vase; sa tige, garnie d'un filet de vis,
le couvercle C qui fait fonction d'
se termine par une poignée à l'aid
quelle on peut la faire tourner dans c
Lorsqu'on vient à agir sur cette poi
manière à faire descendre le piston
le vase A, l'eau qu'il contient épro
pression de la part de ce piston; cet
sion se transmet au réservoir *a*, et a
qu'il contient, et l'on voit l'index de
s'abaisser dans le tube *b*. Si la
intérieure du réservoir *a* et de la
du tube qui est au-dessous de l'i
mercure, pouvait augmenter par sui
pression qui est exercée, l'abaisse
cet index ne prouverait pas que l'ea
nue dans le réservoir *a* diminué de
Mais il n'en est pas ainsi. Le réserv
tube sont soumis de toutes parts à
sion qui est déterminée par l'enfonce
piston B : le verre dont ils sont fo
comprimé dans tous les sens de la m
nière. Si l'on considère une petite p


Fig. 310.

cette enveloppe de verre, on verra que ses dimensions doive
nuer, tant dans sa hauteur et sa largeur, que dans son ép
en un mot, le réservoir *a* et le tube *b*, diminuant de dim
dans tous les sens, doivent prendre une forme *sembla*
forme qu'ils avaient d'abord : le mot semblable étant em
dans l'acception qu'on lui donne en géométrie. La pression
par le piston B donne donc lieu à une diminution de la cap
térieure du réservoir *a* et du tube *b*, tout aussi bien qu'à u
nution de l'espace occupé par le verre dont ils sont formés.
cela, si l'index de mercure restait stationnaire dans le

ent où l'on exerce la pression, cela indiquerait déjà que l'eau
servoir *a* a diminué de volume; l'abaissement de l'index indi-
onc, à plus forte raison, une diminution réelle dans le volume
au.

tube de verre *m*, fermé par le haut, et gradué en parties d'é-
olume, est placé à côté du réservoir *a*. Ce tube était plein d'air
e l'eau du vase A n'était soumise qu'à la pression atmosphé-
. La pression, produite par l'abaissement du piston B, déter-
ne diminution de volume de cet air ; l'eau monte dans le
s ; la position qu'y occupe son niveau dépend de la grandeur
pression, et peut servir à la mesurer. Ce tube *m*, ouvert par
s, et primitivement rempli d'air, constitue un véritable mano-
e à air comprimé.

es expériences précises, faites par M. Regnault, avec un appa-
n peu différent de celui dont nous venons de parler, l'ont con-
aux résultats suivants. Le volume d'une masse d'eau diminue
,000048 pour chaque atmosphère dont s'accroît la pression que
orte cette eau ; c'est-à-dire que, si une masse d'eau, dont le
ne est d'un million de litres, lorsque l'eau n'a aucune pression
porter, venait à être soumise à une pression de 1 atmosphère,
atmosphères, de 3 atmosphères,..... son volume diminuerait
8 litres, de 2 fois 48 litres, de 3 fois 48 litres,..... Le volume
e masse de mercure diminue de même de 0,0000035, pour
que atmosphère dont augmente sa pression.

**263. Équilibre des fluides dont les diverses parties ne
t pas à la même température.** — Nous avons trouvé qu'un
ide, ou un gaz, soumis à la seule action de la pesanteur, ne
vait être en équilibre qu'autant que la pression était la même
r tous les points situés sur un même plan horizontal (§§ 212 et
) ; cette condition ne peut être remplie qu'autant que la tempé-
ure est aussi la même pour tous les points. Supposons, en effet,
le fluide que nous considérons soit divisé en couches minces
un grand nombre de plans horizontaux menés à de petites dis-
ces les uns au-dessus des autres, et voyons ce qui arriverait si
empérature n'était pas la même dans toute l'étendue d'une de
couches. Nous savons que, sous une même pression, la densité
n fluide (liquide ou gaz, peu importe) est, sauf quelques excep-
s, d'autant plus faible que sa température est plus élevée. La
sité du fluide varierait donc dans l'étendue de notre couche ; et
pression étant la même pour tous les points de sa face supérieure,
serait plus la *même pour tous* les points du plan horizontal qui
rmine *inférieurement* : puisque la différence des pressions en

deux points d'une même verticale, pris sur les deux fac
couche, est égale au poids de la colonne de fluide com
ces deux points, et que ce poids ne serait pas le mêm
diverses parties de la couche. L'inégalité de température
points d'une même couche horizontale ne peut donc pas
avec l'équilibre du fluide, puisqu'il en résulte nécessai
inégalités de pression, pour des points situés à un mê
Donc un fluide pesant, dont les diverses parties ne so
même température, ne peut être en équilibre qu'autan
disposé par couches horizontales, dans chacunes desque
pérature est la même partout. Ces couches superposées ser
si elles étaient formées d'autant de liquides de différent
qui ne peuvent être en équilibre les uns au-dessus des a
que leurs surfaces de séparation soient planes et horizonta
La stabilité de l'équilibre exigeant d'ailleurs que la densit
pas en passant d'une couche à une autre couche plus
voit que généralement la température croîtra à mesure c
vera dans le fluide.

Ce dernier résultat est sujet à quelques exceptions. O
exemple, que la densité de l'eau, qui décroît généralemen
que la température s'élève, s'accroît au contraire lorsq
pérature passe de 0° à 4°,1 : cette anomalie en entraîne u
pondante dans la distribution des températures, dans le
parties d'une masse d'eau en équilibre, lorsque parmi ce
tures il s'en trouve qui sont comprises entre 0° et 4°,1. I
masse de gaz, d'une température uniforme, est en équilib
ches supérieures sont moins denses que les couches
(§ 240); on conçoit qu'on puisse refroidir les couches su
d'une quantité assez petite, pour que leurs densités, tou
mentant par cet abaissement de température, restent
plus faibles que celles des couches inférieures : l'équilil
tera encore, et restera stable, quoique la températur
quand on passera d'une couche à une autre plus élevée
dernier cas qui se présente dans l'atmosphère de la terre :
tés des couches horizontales, dans lesquelles on peut d
une colonne d'air s'élevant dans toute la hauteur de l'at
vont constamment en diminuant de bas en haut, et ce
température s'abaisse aussi constamment.

§ 264. Lorsqu'un liquide est en équilibre dans un vase
chauffe extérieurement une portion de la paroi latérale ou
du vase, la chaleur se transmet au liquide à travers cett
l'équilibre est troublé. Le liquide échauffé monte ; il es

[redacted]

ıortion de liquide qui s'échauffe à son tour, et ainsi
ɔrte qu'il en résulte un mouvement continuel de cir-
mène successivement les diverses portions du liquide
ɛc la paroi chauffée, et détermine une élévation pro-
température de toute la masse liquide. Si le liquide
ɛeulement par le haut, le mouvement de circulation
ɔns de parler ne se produirait pas, et la chaleur ne se
ı avec une grande lenteur dans toute la masse liquide.
t ainsi produit dans une masse d'eau, par l'échauffe-
artie de la paroi du vase qui la renferme, peut être
ıu moyen d'un peu de sciure de bois qu'on introduit
ɛ, et dont les diverses parcelles participent au mou-
onné par la chaleur.
nents analogues se produisent dans une masse de gaz
orsqu'on vient à chauffer une portion de la paroi dans
z est renfermé, ou bien un corps avec lequel il est en
ın fait du feu dans un poêle dont le tuyau s'élève au
· contenu dans une chambre, ce tuyau s'échauffe, et
ıche, s'échauffant également, se met en mouvement
:. Un courant ascendant existe ainsi continuellement,
ı tuyau, tant qu'il reste plus chaud que l'air environ-
ant est rendu visible, lorsque la lumière du soleil vient
.uyau, et projeter son ombre sur un mur voisin ; on voit,
ıtre de l'ombre du tuyau, des ombres légères qui vol-
pidité, et qui sont produites par
nière dans l'air en mouvement,
changements de densité de cet
ɛs par le mouvement lui-même.
aussi rendre le courant ascen-
sible, en adaptant au tuyau un
urbé de bas en haut, *fig.* 341,
sa pointe une bande de papier
tout autour de lui en forme
, en venant frapper la face in-
ette bande de papier, qui se
out obliquement sur son pas-
munique un mouvement de ro-
de la verticale qui passe par
ɔpui.

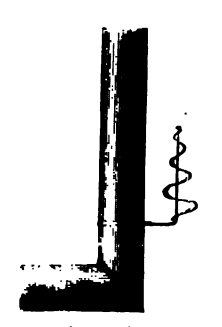


Fig. 341.

ments de l'air atmosphérique, c'est-à-dire les *vents*,
que certaines parties de l'atmosphère changent de
nservant *une même* force élastique, en sorte que

l'équilibre ne pouvant plus subsister, l'air se met e pour prendre une disposition différente dans laquelle veau en équilibre. Si la cause qui a troublé l'équilib agir, le mouvement de l'air continuera également. Les de densité qui déterminent ces mouvements sont pro des changements de température, soit par la présenc tité plus ou moins grande de vapeur d'eau qui vie l'air.

§ 265. **Aérage des mines.** — Il arrive souvent rempli d'air communique de plusieurs manières diff l'atmosphère : c'est ainsi que l'air contenu dans une c communication avec l'air atmosphérique, soit par l portes et fenêtres, soit par la cheminée. Dans de par stances, les différences de température en divers poi nent encore des mouvements de l'air, ainsi que nous all naître.

Considérons d'abord ce qui arrive, quand une cavité une mine, p communique a phère par deu ticaux, *fig.* 342. libre de l'air, t rieur de la mine rieur, il faut qu soit la même p points situés s plan horizontal térieur d'une p conque de l'es par le gaz. L en A et B doive égales entre ell les pressions en la différence d en A et en C est é

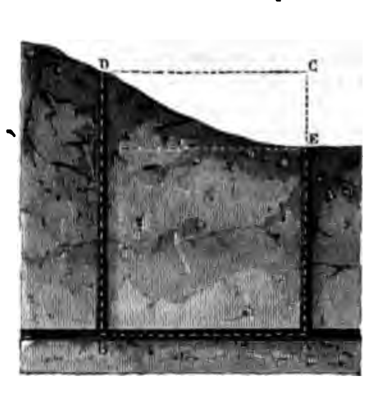


Fig. 342.

de la colonne d'air AC ; la différence des pressions en égale au poids de la colonne d'air BD : donc il faut que deux colonnes d'air AC, BD, soient les mêmes. Cet sera remplie, si la température est la même dans tou de la masse d'air. Elle le sera encore, si la températur même manière le long des deux colonnes d'air AC, I encore si les changements de densité résultant des

qui existent le long de ces colonnes d'air se compensent
et d'autre. Mais il arrivera très rarement que les choses se
ainsi : habituellement les poids des colonnes d'air AC, BD,
t pas égaux, et l'équilibre ne pouvant avoir lieu, il en résul-
mouvement, en vertu duquel l'air descendra par un des
its, et remontera par l'autre.
osons que les orifices des deux puits ne soient pas au même
comme l'indique la *fig.* 342. Cette seule circonstance don-
u à un courant d'air continuel à l'intérieur de la mine, cou-
sera dirigé dans un sens en été, et en sens contraire en
On sait, en effet, que la température de l'intérieur de la
une petite profondeur au-dessous du sol, reste constante
t toute l'année, et que cette température est inférieure à
e l'air en été, supérieure au contraire à celle de l'air en

portions AE, BF de nos deux colonnes d'air, qui sont si-
u-dessous du plan horizontal mené par le plus bas des ori-
es deux puits, peuvent être regardées comme ayant la même
ature, puisqu'elles sont en contact avec des parois dont la
rature est la même. Mais il n'en est plus ainsi des portions
tes CE, DF : la première est à l'extérieur de la terre, et la
le est à l'intérieur. En été, la colonne d'air CE sera plus chaude
colonne DF, et par conséquent moins pesante qu'elle ; l'iné-
de poids des colonnes totales AC, BD, donnera lieu à un mou-
nt ascendant dans le puits de droite, et descendant dans le
de gauche. L'air chaud, venant de l'extérieur, et pénétrant
le puits de gauche, s'y refroidira, et le mouvement continuera
amment de la même manière. En hiver, la colonne d'air CE sera
roide que la colonne DF ; il en résultera encore une inégalité
ids pour les deux colonnes AC, BD. Mais cette inégalité ne
plus dans le même sens qu'en été, et elle donnera lieu à un
ement de sens contraire, qui se continuera également, tant que
npérature de l'air sera moins élevée en dehors des puits qu'à
ntérieur.
est indispensable qu'il se produise, à l'intérieur des mines, des
nts tels que ceux dont nous venons de parler, afin de renou-
l'air dans les lieux où se trouvent les ouvriers. Lorsqu'une
ne se trouve pas dans des conditions convenables pour que
ge se fasse naturellement, comme nous venons de l'indiquer,
recours à des moyens artificiels. Un de ceux qu'on emploie le
fréquemment, *consiste à établir* un petit foyer dans le voisi-
de l'un des deux puits qui communiquent l'un à l'autre par

l'intérieur de la mine ; les gaz chauds qui se dégagent de ce
rendent dans le pu
différence de ter
des colonnes d'air
tent dans les de
détermine un cour
les mines de houi
souvent dangereu
ployer ainsi des fo
rage : parce que
vient de la mine
une partie passe
foyer, peut conten
sez grande quant
drogène carboné p
se produise une e
qui s'étendrait dan
mine. Dans ce cas
surmonter l'orifice
puits d'une chemi
pel, et établir, ve
de cette cheminée,
rifère A, *fig.* 343,
surface extérieure
en contact avec
vient de la mine.

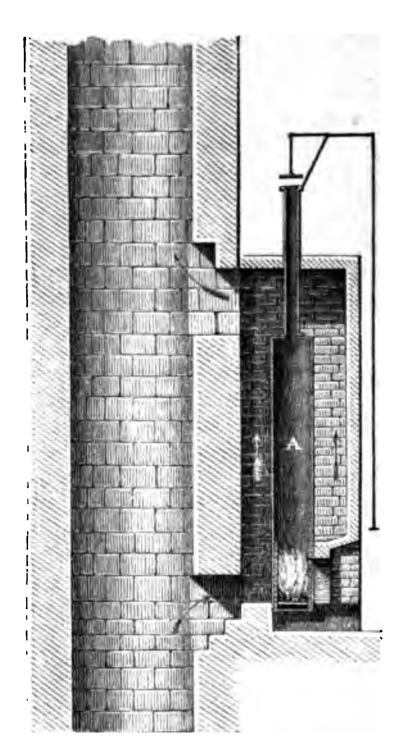


Fig. 343.

Souvent la cavit
raine qu'on veut
communique avec
phère que par un s
Dans ce cas on
puits en deux c
ments par une cl
ticale ; ou bien on
dans le puits un large tuyau, afin de faire communiquer l'ai
avec l'atmosphère par deux voies différentes. On s'arran
de manière à produire une différence de température dans
compartiments du puits, et les choses se passent de la même
que s'il y avait deux puits distincts.

§ 266. **Tirage des cheminées.** — Le tirage d'une c
est dû à la différence des densités de l'air qui est à son int
de l'air extérieur qui est situé au même niveau. L'air de

ıambre où existe cette cheminée ne peut être en équilibre
nt qu'il éprouve une pression égale sur tous les points d'un
ılan horizontal, soit que cette pression lui soit transmise par
ıur de la cheminée, soit qu'elle le soit par les fentes des por-
les fenêtres. Si l'air extérieur est en équilibre, les pressions
s mêmes pour tous les points d'un même plan horizontal qui
u-dessus de la cheminée; pour que les pressions exercées
plan horizontal mené à l'intérieur de la chambre soient toutes
entre elles, il faut donc que l'on trouve le même poids pour
nne d'air comprise entre ce plan horizontal et le précédent,
ı'on la prenne à l'intérieur de la cheminée, soit qu'on la
e à l'extérieur. Mais cela ne peut pas arriver lorsque l'on
ı feu dans la cheminée: la chaleur dilate l'air qui y est con-
et la colonne d'air qui lui correspond est moins pesante qu'une
ne de même hauteur prise à l'extérieur. Il en résulte qu'il ne
pas y avoir équilibre, et tant que la différence de température,
r suite la différence de densité subsiste, il y a un mouvement
nuel en vertu duquel l'air de la chambre monte dans la chemi-
tandis que l'air extérieur rentre dans la chambre par les joints
ıortes et des fenêtres. Si la chambre était hermétiquement fer-
de toutes parts, de manière que l'air extérieur ne puisse pas y
ıer, la cheminée fumerait nécessairement: puisque le courant
dont nous venons de parler, courant qui entraîne la fumée avec
ne pourrait nullement s'établir.

orsque l'on fait du feu dans deux chambres qui communiquent
e avec l'autre, il arrive souvent que l'une des deux cheminées
e. Cela tient à ce que, les communications avec l'extérieur, par
oints des portes et des fenêtres, présentant quelques difficultés
nouvement de l'air, la masse d'air qui est contenue dans les
x chambres, et qui va librement de l'une à l'autre, se trouve
s des conditions analogues à celles de l'air d'une mine. Les deux
minées, par lesquelles cette masse d'air communique avec l'at-
ıphère, jouent le même rôle que les deux puits qui relient l'inté-
ır de la mine avec la surface du sol; et pour peu que les colon-
d'air contenues dans ces deux cheminées n'aient pas le même
ds, il s'établit un courant ascendant d'une part, et descendant
l'autre. Ce n'est qu'en faisant un grand feu dans les deux chemi-
s qu'on pourra les empêcher de fumer l'une et l'autre; parce
en déterminant ainsi un appel assez considérable dans chacune
lles, on fera passer, par les faibles ouvertures qui communiquent
dehors, une quantité d'air suffisante pour alimenter les deux
eminées.

On comprend, par ce qui précède, que plus une che élevée, plus le tirage devra être fort. Cependant, au dela taine limite, une plus grande élévation de la cheminé mine pas une augmentation de tirage. On conçoit en effi force ascensionnelle de la colonne d'air contenue à l'inté cheminée s'accroît avec la hauteur de cette cheminée, ments que cet air éprouve dans son mouvement s'accrois et il peut arriver que ce que l'on gagne d'un côté, on le l'autre. C'est ce qui arrive en effet : aussi n'y a-t-il pas d sous le rapport du tirage, à donner une hauteur démes cheminée.

Lorsqu'on a été quelque temps sans faire du feu dans minée, et que l'air atmosphérique, après avoir été froi plusieurs jours, acquiert une température plus élevée, o qu'il se produit un courant descendant par la cheminé aperçoit à l'odeur de suie qui se répand dans la chambre. à ce que, l'air qui est à l'intérieur de la cheminée étant que l'air extérieur situé au même niveau, et ayant, par plus grande densité, la colonne d'air intérieure est plus pe la colonne d'air extérieure, pour une même hauteur : et c' détermine un courant en sens contraire de celui qui existe fait du feu dans la cheminée. Dans ce cas l'air de la cham au dehors par les ouvertures des portes et des fenêtres; remplacé par celui qui descend de la cheminée.

§ 267. **Principe d'Archimède.** — Un liquide pesant, e bre, exerce des pressions sur tous avec lesquels il est en contact. Si l à son intérieur un corps solide A, *fig* corps solide sera pressé par le lic toutes les parties de sa surface ; t pressions auxquelles il sera ainsi so une résultante, dont nous allons rec à la fois l'existence et la grandeu raisonnement suivant.

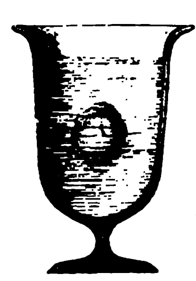


Fig. 244.

Supposons d'abord que nous avons ment une masse liquide en équilibre, quelle aucun corps n'est plongé. Nous considérer à son intérieur une portion c dont l'ensemble présente exactement la même forme que le Cette portion de liquide reste immobile, quoiqu'elle soit pesan ne tombe pas, en cédant à l'action de la pesanteur, parce qu soutenue par le liquide environnant. Imaginons que cette p

ide soit solidifiée, sans changement de densité, c'est-à-dire que ses molécules ne soient plus susceptibles de changer de position les par rapport aux autres, tout en restant aux mêmes distances ives que précédemment : il est clair que, par là, nous n'aurons pas blé l'équilibre. Nous aurons donc ainsi un corps solide, ayant tement la même forme que le corps A, et qui sera soutenu au m du liquide qui l'environne, par les pressions que ce liquide ce aux divers points de sa surface. Ces diverses pressions, fai- équilibre au poids du corps solide dont nous parlons, doivent r une résultante égale et directement opposée à ce poids ; c'est- re que cette résultante est verticale, qu'elle agit de bas en haut, me sa direction passe par le centre de gravité du corps. Con- ons maintenant que ce corps soit anéanti, et que le corps A lui substitué, sans que le liquide ait été dérangé, il est bien évident les pressions exercées par le liquide, sur toute la surface de ce s A, seront les mêmes que celles qui agissaient précédemment le corps dont il tient la place. On doit en conclure que *les pres- s exercées par un liquide sur la surface d'un corps A, qui plonge on intérieur, ont une résultante verticale, agissant de bas en t, et égale au poids du liquide qui occuperait la place du corps* et que, de plus, *cette résultante passe par le centre de gravité liquide déplacé.* Ce principe, d'une très grande importance, a découvert par Archimède, et porte son nom.

La résultante des pressions supportées par un corps qui plonge s un liquide pesant en équilibre tend à faire monter ce corps : poids tend à le faire descendre : le corps montera ou descendra, s l'action simultanée de ces deux forces, suivant que la première mportera sur la seconde, ou réciproquement. Dans le cas où le ids du corps sera plus grand que la résultante des pressions qu'il pporte, il tombera : mais le mouvement qu'il prendra ne sera oduit que par l'excès de son poids sur l'autre force. C'est ce qu'on once en disant qu'*un corps, plongé dans un liquide, y perd une rtion de son poids, égale au poids du liquide déplacé.*

§ 268. — Le principe d'Archimède peut être vérifié par l'expé- nce, à l'aide de la *balance hydrostatique.*

Cette balance, dont le nom est tiré des usages auxquels elle est ployée, présente une disposition particulière, qui permet d'é- er ou d'abaisser à volonté le fléau, ainsi que les deux plateaux il supporte. A cet effet, le fléau est supporté par une tige quiètre à l'intérieur d'une colonne creuse, fixée au pied de la ance, *fig.* 345 ; cette tige, dentée en forme de crémaillère, en- ne avec un pignon C, à l'aide duquel on peut la faire monter ou

descendre. La tige présente en outre, sur sa face opposé
dents, dans lesquelles pénètre un doigt D, mobile a
point fixe situé vers son milieu; un petit ressort, e
l'extrémité inférieure de ce doigt, maintient constamme

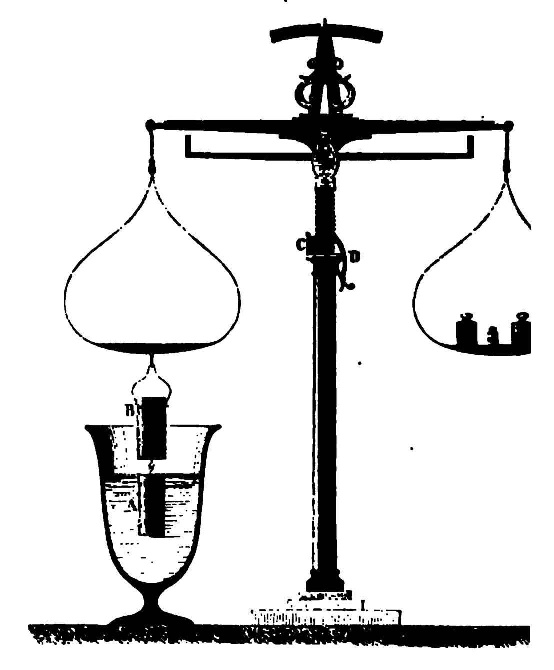


Fig. 315.

trémité supérieure engagée entre les dents. Par cette d
on peut faire monter la tige qui supporte le fléau, en faisa
le pignon C, sans que le doigt D s'y oppose; et le doig
ensuite le fléau de redescendre, lorsqu'on n'agit plus sur
Lorsqu'on veut abaisser le fléau, on presse sur l'extré
rieure du doigt D; on fait fléchir le petit ressort, et l'ext
périeure, en s'écartant des dents de la tige, lui permet de re
librement.

Voyons maintenant comment on se sert de la balance
tique pour vérifier le principe d'Archimède. On prend c

[redacted]

A, et un cylindre creux B, dont la capacité intérieure xactement remplie par le premier. On les suspend l'un de l'autre, comme l'indique la figure, à un crochet ın des plateaux de la balance, et on leur fait équilibre, t des poids dans l'autre plateau. Cela fait, on élève le les deux plateaux, ce qui ne détruit pas l'équilibre; puis, osé un vase contenant de l'eau, au-dessous des deux A et B, on abaisse le fléau, de manière à faire plonger le dans le liquide. Aussitôt que ce cylindre a pénétré un 'eau, l'équilibre est troublé: le plateau qui supporte les ıdres A et B n'agit plus assez fortement sur le fléau, pour ibre au poids de l'autre plateau. Cela tient à ce que le ι, soulevé par le liquide dans lequel il plonge, se trouve ıêmes conditions que s'il perdait une portion de son poids. olir l'équilibre, il suffit de verser de l'eau dans le cylindre et l'on voit qu'il ne peut être rétabli, de manière que le oit entièrement plongé dans l'eau du vase, *fig.* 345, qu'au- e cylindre B est entièrement rempli d'eau. On vérifie bien le corps A, plongé dans l'eau, y perd une portion de son le au poids de l'eau dont il tient la place.

Lorsqu'un corps solide est abandonné au milieu d'un li- est soumis à l'action de deux forces qui agissent en sens s: son poids tend à le faire descendre, ıltante des pressions que le liquide ur sa surface, ou bien ce que l'on a *poussée* du liquide, tend à le faire La première de ces deux forces est e au centre de gravité G du corps, : la seconde force, capable de main- équilibre le liquide qui tiendrait la ı corps, si ce liquide était solidifié, regardée comme appliquée au centre té G' de ce liquide. Si le corps était ıe, c'est-à-dire si la matière dont il osé était répartie uniformément dans

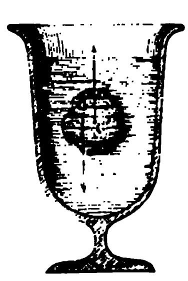


Fig. 346.

tendue du volume qu'il occupe (§ 39), son centre de gravité ıderait avec le centre de gravité G' du liquide qu'il déplace : ı'en est généralement pas ainsi, lorsque le corps n'est pas ıe.

qu'un corps solide, placé au milieu d'un liquide, s'y main- n *équilibre, il faut : 1° que son* poids soit égal au poids du *u'il déplace : 2° que les* centres de gravité du corps et du



liquide, ne coïncide pas avec le centre de gravité d
déplace, l'équilibre sera stable ou instable, suivant
de ces deux points sera placé au-dessous ou au-dessu

Lorsqu'un poisson reste complétement immobile
l'eau, il remplit les deux conditions dont nous venons
par un moyen quelconque, il vient à augmenter son
augmenter son poids, l'équilibre sera troublé ; la po
devenant plus forte qu'elle n'était précédemment, le
Le contraire aura lieu, s'il diminue son volume ; la
quide diminuera en même temps, et l'excès de son p
poussée le fera descendre. C'est au moyen d'un orga
qu'on nomme la *vessie natatoire*, que certains poiss
ces augmentations et diminutions de leur volume. Ce
siste en une enveloppe fermée qui contient un gaz. Un
plus ou moins grande, exercée par l'animal sur cette
lui fait éprouver une diminution de volume corres
sorte que, par cette seule compression, qu'il fait var
il peut s'élever ou s'abaisser dans l'eau au milieu de
plongé.

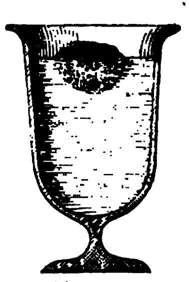
Lorsqu'on introduit un grain de raisin dans un ver
de Champagne, ce grain tombe immédiatement au f
Mais l'acide carbonique, qui se dégage continuellement
vient bientôt s'arrêter, sous forme de petites bulles, t

[redacted]

au milieu d'un liquide, et si son poids est inférieur
juide qu'il déplace, il remonte vers la surface. C'est
ait, par exemple, pour un morceau de liége qu'on au-
au milieu d'une masse d'eau. Mais lorsque ce corps
ré jusqu'à la surface du liquide, il s'y arrête et y prend
position d'équilibre. Dans cette position, il n'est pas
longé dans le liquide; il fait saillie au-dessus de sa

eporte au raisonnement qui a été fait (§ 267) pour ar-
ipe d'Archimède, on se rendra compte facilement de
nt l'équilibre peut être établi. Le corps, ne plongeant
dans le liquide, ne doit pas en éprouver une poussée
que s'il y plongeait en totalité. Si le corps était anéanti
nt, et que le creux qu'il laisserait ainsi dans la masse
mpli avec du liquide de même nature, ce liquide, qui
lace de la partie plongée du corps, serait maintenu en
les pressions exercées sur toute sa surface par le li-
nant. Ces pressions étant les mêmes que celles que
corps, on peut dire que la poussée d'un liquide sur un
iètre partiellement à son intérieur, est égale au poids
éplacé par la partie plongée du corps; de plus, la force
te la poussée peut être supposée appliquée au centre
ce liquide déplacé.

poussée d'un liquide, sur un corps qui est entièrement
intérieur, est plus grande que le poids du corps, celui-ci
ce qu'il ait atteint la surface libre
ès lors, s'il continue à monter, la
ste plongée dans le liquide dimi-
n plus; la poussée du liquide sur
nue en conséquence, et l'on conçoit
un moment où cette poussée, qui
plus grande que le poids du corps,
égale. Si le corps continue à mon-
de sa vitesse acquise, la force qui
bas en haut diminuera encore; son
rtera sur cette force, et détruira
nouvement ascendant pour le faire
. Le corps viendra ainsi prendre
d'équilibre, dans laquelle il se maintiendra en flottant
lu liquide. Pour que cet équilibre existe, il faut: 1° que
l du corps soit égal au poids du liquide que déplace sa
ie; 2° *que le centre de* gravité G du corps, fig. 347,


Fig. 347.

et le centre de gravité G' du liquide déplacé, soient situés sur
même verticale.

On voit par là que, pour qu'un corps puisse flotter sur un li
il faut que son poids soit inférieur au poids d'une quantité
liquide qui aurait le même volume que lui ; et que, à égalité
lume, des corps flottants déplaceront d'autant moins de liqu
par suite feront d'autant plus saillie au-dessus de la surface
liquide, que ces corps seront moins pesants.

§ 271. Les conditions qui viennent d'être énoncées sont n
saires et suffisantes pour qu'un corps flottant soit en équilibre ;
l'équilibre peut être stable ou instable, suivant les cas. Lo
nous avons parlé de l'équilibre d'un corps entièrement plongé
un liquide (§ 269), nous avons dit que l'équilibre serait sta
instable, suivant que le centre de gravité du corps se trouver
dessous ou au-dessus du centre de gravité du liquide déplac
n'en est plus de même ici : la stabilité de l'équilibre n'exige p
que le premier de ces deux points soit inférieur au second, ainsi
nous allons le reconnaître.

Examinons d'abord ce qui arriverait dans le cas d'un cylindre
petit diamètre, formé de deux parties de densités très différen
et réunies bout à bout, *fig.* 318. Admettons
ce corps ait été construit de manière à pou
flotter dans un liquide, en se plaçant verti
lement, et en ayant son centre de gravité au
dessous de celui du liquide qu'il déplace.
l'on incline le cylindre d'un côté ou d'un au
tre, comme l'indique la figure, il se relève
immédiatement sous l'action des deux forces
qui lui sont appliquées, et dont l'une est le
poids qui agit de haut en bas sur son centre
de gravité G, et l'autre est la poussée du li-
quide agissant de bas en haut sur le centre
de gravité G' du liquide déplacé. L'équilibre
est donc stable, et il en sera de même, quelle
que soit la forme du corps, pourvu que le point G se trouve au-
dessous du point G'.

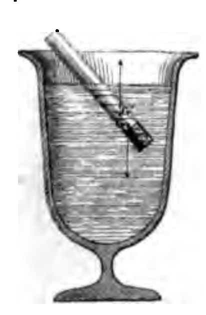


Fig. 318.

Voyons maintenant ce qui arrivera, si le corps flottant est homo-
gène et a la forme d'un parallélipipède rectangle aplati, *fig.* 319
ce sera, par exemple, un morceau de liége qu'on fera flotter sur
l'eau. Ce morceau de liége se placera naturellement de manière que
ses deux plus grandes faces soient horizontales ; la partie plongée
dans l'eau aura donc aussi la forme d'un parallélipipède rectangle

[redacted]

ravité G et G′ du corps et du liquide déplacé, n'é-
que les centres de figure des deux parallélipipèdes,
a nécessairement placé au-
1 G′ : et cependant l'équilibre
i à quoi cela tient. Le centre
i morceau de liége conserve
variable à l'intérieur de ce
ue manière qu'on déplace le
ait de même du centre de gra-
iide déplacé, s'il coïncidait
n même point du morceau de
u'en inclinant ce corps d'un
itre, la ligne GG′ s'inclinerait
s, et que les forces qui agis-
its G, G′, la première de haut
ide de bas en haut, feraient basculer le morceau de
ener dans une autre position d'équilibre. Mais ce
ue les choses se passent. Aus-
rceau de liége est dérangé de
uilibre, le liquide qu'il déplace
re ; le centre de gravité G′ de
e donc, dans le corps, une tout
celle qu'il occupait précédem-
ps flottant a été incliné vers la
0, le point G′ ne se transporte
la verticale menée par le point
ferait s'il suivait le corps dans
; mais il se porte vers la gau-
ulte que les forces qui sont ap-
ints G et G′ tendent à ramener
it dans la position d'équilibre
quitter.

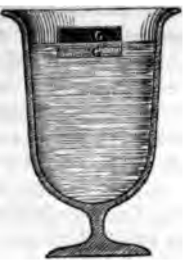


Fig. 349.

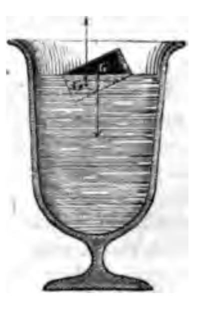


Fig. 350.

lure de ce qui précède, que la stabilité de l'équilibre
ant n'exige nullement que le centre de gravité de ce
essous de celui du liquide qu'il déplace. L'équilibre
cette condition est remplie ; mais il pourra y avoir
ilité, sans qu'elle le soit.

n prend des aiguilles à coudre, qu'on les passe plu-
e les doigts, pour les enduire d'une très légère couche
qu'on les pose avec soin sur la surface de l'eau con-
vase, *on voit ces* aiguilles se maintenir sur cette
tter, comme si elles étaient formées d'une matière



(*fig.* 312, page 344). Cette dépression capillaire d
l'eau, déterminée par la présence de l'aiguille, donn
tion d'une sorte de sillon dans lequel l'aiguille est pla
en raison de la légère couche de graisse dont on l'a
lui a donné la propriété de ne pas être mouillée pa
donc un volume de liquide plus grand que son pro
l'on conçoit que la quantité de liquide ainsi déplacée
poids égal au poids de l'aiguille. En sorte que cette ai
dans les mêmes conditions qu'un corps de même po
le volume serait plus que suffisant pour remplir la t
dont nous venons de parler ; ce corps serait moins d
et flotterait sur sa surface, conformément au principe

Cette assimilation de l'aiguille à un corps moins d
plirait la totalité du sillon que sa présence détermine
l'eau, peut ne pas paraître bien légitime. Un corps fl
est pressé par le liquide, dans toute l'étendue des p
vité que ce corps détermine en pénétrant à son intér
résultante de toutes ces pressions qui constitue la pou
sur le corps, poussée qui est toujours égale au poids
le corps déplace. Dans le cas d'une aiguille qui flott
un effet de capillarité, on ne voit pas que le liquide p
presser l'aiguille dans toute l'étendue des parois du
occasionne, puisqu'elle n'occupe qu'une partie de la

[redacted]

ression sur sa base, soit que l'aiguille s'y trouve placée à la de l'eau, soit qu'elle soit enlevée, et que le sillon qu'elle soit rempli d'eau de manière à rétablir l'horizontalité dans étendue de la surface libre. Il résulte évidemment de là que s de l'aiguille est égal au poids du liquide capable de remplir a qu'elle forme; ou bien encore, que la poussée du liquide sur le est égale au poids du liquide total qui est déplacé, tant par a par l'effet de l'action capillaire que sa présence détermine. t de la même manière qu'on explique que certains insectes ent sur l'eau, *fig*. 351, sans que leurs pattes pénètrent à l'in- du liquide.

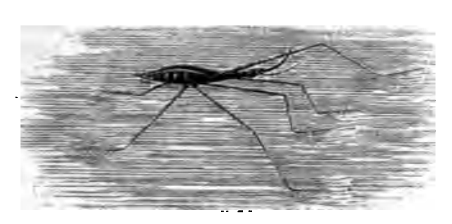


Fig. 351.

ttes de ces s sont dans nditions con- es pour ne re mouillées au. Lorsqu'el- ennent s'ap- sur la surface uide, elles oc- ment des dé- ions de cette surface; et l'insecte est en équilibre, lorsque les déterminés ainsi par ses diverses pattes sont tels que l'eau qui mplirait pèse autant que lui.

73. **Mesure des densités.**—Le principe d'Archimède fournit yen très simple de déterminer la densité d'un corps solide ou iquide; c'est-à-dire de trouver le rapport du poids du corps ds d'un égale volume d'eau. Pour cela on peut se servir de la e hydrostatique, *fig*. 345 (page 392).

s'agit d'un corps solide, on le suspend au-dessous de l'un des ux de la balance, à l'aide d'un fil très délié; et on lui fait équi- n mettant des poids marqués dans l'autre plateau. De cette re, on obtient le poids du corps, tout aussi bien que si, au lieu uspendre au crochet dont est muni l'un des plateaux, on l'a- acé sur ce plateau. En opérant ensuite comme il a été dit dans graphe 268, on fait plonger le corps dans un vase qui contient u. L'équilibre est troublé; et on le rétablit en ôtant une por- s poids marqués qui faisaient équilibre au corps. Les poids ts servent de mesure au poids du corps, lorsqu'il est dans c'est-à-dire au poids du corps diminué du poids d'un égal vo- 'eau. Donc en divisant le poids du corps par la perte que ce éprouvée lorsqu'on a fait plonger le corps dans l'eau, on

aura la densité de ce corps. Si, par exemple, le corps dont trouver la densité pèse 25gr, 72 hors de l'eau, et 18gr, 37 da la perte de poids sera de 7gr, 35 ; et la densité sera égale à bien à 3, 5.

Pour déterminer la densité d'un liquide, on prendra un lide quelconque que l'on suspendra à l'un des plateaux de la hydrostatique ; puis, après avoir pesé ce corps, on chercher sont les pertes de poids qu'il éprouve, lorsqu'on le fait successivement dans l'eau et dans le liquide que l'on consi deux pertes de poids sont les poids d'une masse d'eau masse de l'autre liquide, ayant toutes deux le même volu corps solide employé. Si l'on divise la seconde perte de p la première, on aura bien le rapport du poids d'un certai du liquide dont on s'occupe, au poids d'un égal volume d'ea à-dire la densité de ce liquide.

Le poids d'un volume d'eau égal au volume du corps dont trouver la densité varie avec la température de l'eau ; aussi sité du corps ne peut-elle être définie exactement qu'au l'eau qui sert de terme de comparaison est supposée avoir u pérature déterminée. Lorsqu'on trouve la densité d'un cor ou d'un liquide par les moyens qui viennent d'être indiqu nécessaire de corriger le résultat obtenu, en raison de c température de l'eau qu'on a employée n'était pas celle q suppose dans la définition des densités. Nous n'indiquerons la manière de faire cette correction, pour laquelle on peut a cours aux traités de physique ; nous nous contenterons de d dans un grand nombre de circonstances, cette correction ne nécessaire, et que même, au lieu de se servir d'eau pure, o se servir d'eau ordinaire. L'erreur qui en résultera sera très petite, et le degré d'approximation avec lequel la de corps sera obtenue sera généralement suffisant. C'est ce qui par exemple, si l'on cherche la densité d'un corps, pour s' à l'évaluation approximative du poids d'un grand volu corps, ainsi que nous l'avons fait pour l'obélisque de Luxor

§ 274. **Aréomètres.** — Les densités des corps peuvent en obtenues à l'aide d'instruments spéciaux, qui sont désigné nom d'*aréomètres*. On distingue les aréomètres *à volume* et les aréomètres *à poids constant*.

Les aréomètres sont en général des instruments disposé nière à pouvoir flotter, soit sur l'eau, soit sur d'autres liquid auxquels on donne le nom d'aréomètres à volume constan être chargés de poids additionnels, de manière à s'enfonce

[redacted]

ours de la même quantité. La *fig.* 352 représente un de
tres. Il se compose d'un corps creux
supportant inférieurement un corps
et surmonté d'une cuvette C qui lui
par une tige déliée. Sur la tige se
rqué un point D, qu'on nomme *point*
ent. Lorsqu'on introduit cet aréo-
s un vase rempli d'eau, il flotte en se
erticalement: cela tient à ce que le
ordinairement de plomb, fait fonction
que le centre de gravité de l'instru-
entier se trouve plus près de ce corps
tre de gravité de l'eau déplacée. Mais
n'a pas chargé la cuvette C de cer-
s, le point d'affleurement D reste très
ent au-dessus de la surface de l'eau.
nployer cet instrument à la détermi-
la densité d'un corps solide, on le
ns un vase plein d'eau, et l'on charge
C de poids en quantité convenable
le point D soit exactement au niveau
ace de l'eau : on dit alors que l'in-
est affleuré. On pose ensuite, sur la
e corps dont on veut trouver la den-
n enlève en même temps des poids,
re que l'affleurement subsiste. Il est
ent que les poids qu'on a enlevés représentent le poids du
i se trouve ainsi déterminé tout aussi bien qu'avec une ba-
la fait, on retire le corps de la cuvette, et on l'introduit au-
lest B, dans une espèce de panier destiné à le contenir.
ment se trouve détruit par là, puisque le corps, actuellement
de l'eau, y perd une portion de son poids égale au poids de
l déplace; on rétablit cet affleurement en ajoutant des poids
ette, et ces poids, qu'on est ainsi obligé d'ajouter, représen-
ids d'une quantité d'eau ayant le même volume que le corps.
c trouvé : 1° le poids du corps; 2° le poids d'un égal volume
suffit de diviser le premier nombre par le second, pour
ensité du corps.

on d'observer que l'instrument est doué d'une sensibilité
plus grande, et fournit en conséquence des résultats d'au-
exacts, que la tige sur laquelle est marqué le point d'af-
t D est plus déliée. On voit en effet que, si l'on ajoute un

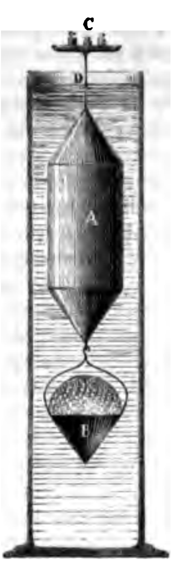


Fig. 352.

petit poids sur la cuvette, l'aréomètre doit s'enfoncer dans l'eau, de manière à déplacer une nouvelle quantité d'eau dont le poids soit égal au poids qu'on a ajouté. Mais l'aréomètre, en s'enfonçant, lorsqu'il est à peu près affleuré, ne déplace une nouvelle quantité d'eau qu'en raison de ce qu'une portion de sa tige s'abaisse au-dessous de la surface de l'eau; l'enfoncement produit par une même augmentation de poids de l'instrument sera donc d'autant plus grand que la section transversale de cette tige sera plus petite. Si, par exemple, la surface de cette section transversale était égale à 1 millimètre carré, une addition de 1 milligramme sur la cuvette ferait enfoncer la tige d'une longueur de 1 millimètre; puisque, là, le volume d'eau déplacé augmenterait de 1 millimètre cube, et qu'un pareil volume d'eau pèse 1 milligramme.

Pour employer le même instrument à la détermination de la densité d'un liquide autre que l'eau, on le plonge successivement dans l'eau et dans ce liquide, en ayant soin de produire l'affleurement, dans chacun des cas, à l'aide de poids placés sur la cuvette. En ajoutant le poids de l'aréomètre lui-même au poids qu'on a dû mettre sur la cuvette pour l'affleurer, lorsqu'il était dans l'eau, on aura le poids de l'eau déplacée par l'instrument, dans cette circonstance. Le poids d'un égal volume du liquide dont on veut trouver la densité s'obtiendra de même en ajoutant le poids de l'aréomètre au poids dont on a dû le charger pour l'affleurer dans ce liquide. En divisant le second de ces deux résultats par le premier, on aura la densité cherchée.

§ 275. Les aréomètres à poids constant servent uniquement à faire connaître la densité des liquides, et sont souvent désignés sous le nom de *pèse-liqueurs*. Ils sont ordinairement de verre, et sont formés d'une partie renflée et creuse *a*, *fig*. 353, d'une tige graduée *b* qui la surmonte, et d'une boule inférieure *c* contenant du mercure qui fait fonction de lest. Un pareil instrument, étant introduit dans un liquide, ne s'y enfonce pas complétement; il flotte à la surface, et se maintient verticalement. Il faut, pour qu'il soit en équilibre, que le poids du liquide qu'il déplace soit égal à son propre poids. Il s'enfoncera donc d'autant moins dans le liquide, que celui-ci sera plus dense; et l'on conçoit que la densité du liquide pourra être indiquée par le point de la tige *b* qui s'arrêtera au niveau de la surface libre de ce liquide.

Fig. 353.

Le mode de graduation de la tige *b* d'un aréomètre à poids constant varie beaucoup, suivant les usages auxquels l'aréomètre est

[redacted]

. S'il doit donner immédiatement la densité d'un liquide, on
, à côté de chaque division de la tige, la densité du liquide
quel l'instrument s'enfonce jusqu'à cette division. S'il doit
indiquer la proportion plus ou moins grande d'eau qu'on a
ite dans du lait, ce qui fait varier en conséquence la densité
iquide, on marque sur la tige les points où l'instrument s'af-
lorsqu'il est plongé dans du lait contenant moitié, un tiers.
rt.... d'eau.

grand nombre d'aréomètres, en usage dans le commerce,
dués d'après des règles de pure convention, indiquées par
, et sont désignés sous le nom d'*aréomètres de Beaumé*. Ces
tres sont de deux espèces, suivant qu'ils servent à *peser* des
s plus denses ou moins denses que l'eau. Pour graduer les
rs, ceux qui servent aux liquides plus denses que l'eau, on
dans l'eau, et l'on marque zéro au point d'affleurement; on
ensuite dans un liquide formé par la dissolution de 15 par-
sel marin dans 85 parties d'eau, et l'on marque 15 au point
rement; enfin on divise l'intervalle de ces deux points en 15
égales, que l'on nomme *degrés*, et l'on prolonge cette divi-
-dessous du point qui porte le 15e degré, jusqu'à l'extrémité
ure du tube. Pour graduer les aréomètres destinés aux li-
moins denses que l'eau, on les met dans une dissolution for-
e 10 parties de sel marin et de 90 parties d'eau, et l'on marque
point d'affleurement; on les introduit ensuite dans l'eau pure,
marque 10 au point d'affleurement; enfin, on divise l'inter-
compris entre ces deux points en 10 parties égales que l'on
e aussi degrés, et l'on prolonge la division jusqu'à l'extrémité
ieure du tube.

76. **Navigation.** — Les bateaux et les navires, dont on se
our effectuer des transports par eau, sont des corps flottants
nt soutenus à la surface de l'eau par la poussée que le liquide
e sur toute la partie immergée de leur surface. Ils doivent donc
er une quantité d'eau dont le poids soit égal à leur propre
On voit par là qu'il n'y a pas de limite pour le poids qu'on
lonner à un navire, y compris son chargement: quelque grand
it son poids, il flottera toujours, pourvu que sa forme lui per-
de déplacer une quantité d'eau suffisamment grande.
r qu'un navire présente des conditions convenables de stabilité
u'il ne coure pas le risque d'être renversé sur le côté, lorsqu'il
dérangé de sa position d'équilibre, il est indispensable que son
de gravité se trouve le plus bas possible. C'est pour cela
place, à la partie inférieure, des matières pesantes qui consti-

tuent le *lest*. Cependant on ne peut pas généralemen
le centre de gravité du navire à être situé au-dessou
gravité du liquide qu'il déplace, dans la position d'é
donc que la forme du navire soit disposée de telle
malgré cette circonstance défavorable à la stabilité d
poussée du liquide tende toujours à le relever, de qu
ait été incliné par l'action d'une cause extérieure (§

Le *tonnage* d'un navire s'évalue d'après la quantité
déplacer, sans cesser d'être dans de bonnes conditions
c'est-à-dire d'après le poids total qu'il peut avoir, pu
est toujours égal au poids du liquide qu'il déplace. L
que l'on adopte dans ce cas est la tonne, ou le ton
1000 kilogrammes (§ 17). Quand on dit qu'un navire
neaux, cela veut dire que son poids peut être porté
logrammes; ou bien encore qu'il peut marcher
200 mètres cubes d'eau.

A mesure que l'on charge un navire, il s'enfonce
déplacer une nouvelle quantité d'eau, qui soit en rap
croissement de sa charge. Mais l'enfoncement qu'il
est d'autant plus faible que sa *surface de flottaison* est
on donne ce nom à l'étendue de la section horizontal
navire par la surface libre du liquide prolongée à so
cette surface était de 100 mètres carrés, un accr
1000 kilogrammes dans la charge du navire le ferait
centimètre; puisqu'il devrait déplacer un mètre cube
que précédemment, et qu'un cylindre dont la base e
tres carrés doit avoir une hauteur d'un centimètre,
volume soit d'un mètre cube.

Les exemples numériques qui viennent d'être donn
que l'eau sur laquelle flotte le navire est de l'eau pure
de l'eau ordinaire : ils sont applicables à la navigation
La densité de l'eau de mer est 1,026 ; un mètre cube
pèse donc 1026 kilogrammes, et une masse de la m
pèse une tonne, n'occupe qu'un volume de $0^{mc},975$.
là de quelle manière les résultats précédents doivent
pour pouvoir s'appliquer à la navigation sur mer.

§ 277. Comme exemple remarquable de l'emploi de
effectuer des transports, nous citerons le moyen emplo
ment par les Égyptiens pour le transport de leurs obél
qu'un obélisque avait été taillé dans la carrière même d
lait l'extraire, on creusait un canal s'étendant sous lui
qu'il ne s'appuyait plus sur le sol que par ses deux e

se remplissait d'eau, lors de la crue du Nil. On amenait alors bateaux chargés de briques, et on les faisait passer sous l'obélisque, fig. 354 : puis on les déchargeait en enlevant les briques. Les bateaux, ainsi allégés, s'élevaient progressivement : bientôt ils touchaient la face inférieure de l'obélisque, et ils ne pouvaient plus lorsqu'on eut retiré assez de briques pour qu'ils pussent soulever l'obélisque. Le monolithe ainsi chargé sur les bateaux, on le transportait facilement à destination, où l'on pouvait le déposer, en opérant d'une manière analogue, mais inverse.

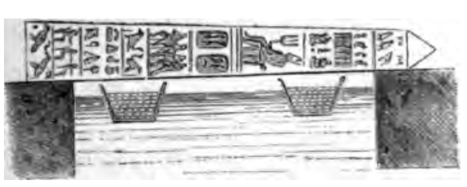


Fig. 354.

§ 278. Lorsqu'un navire, d'un fort *tirant d'eau*, ne peut pas pénétrer dans un port, à cause du manque d'eau, on le soulève à l'aide de bateaux plats nommés *chameaux*, que l'on place de chaque côté. Ces bateaux sont disposés de manière à venir s'adapter contre les flancs du navire. Des câbles que l'on a fait passer sous sa quille s'élèvent de part et d'autre, et viennent aboutir à des cabestans placés sur le pont des chameaux. En manœuvrant ces cabestans, on soulève le navire, dont le poids est porté en partie par les chameaux. Ceux-ci s'enfoncent en même temps : et lorsque le navire a été suffisamment sorti de l'eau, on l'introduit dans le port, avec les deux chameaux, comme si le tout ne formait qu'un seul bâtiment. Ce moyen, employé surtout en Hollande, consiste, comme on voit, à diminuer le tirant d'eau du navire, en augmentant sa surface de flottaison par l'adjonction des chameaux. De cette manière le navire déplace plus d'eau, puisque son poids a été augmenté du poids des chameaux ; mais le volume de l'eau déplacée s'étend beaucoup plus dans le sens horizontal, et sa profondeur est moindre que dans le cas où le navire était seul.

§ 279. **Canaux.** — Pour effectuer des transports par eau, dans des contrées où il n'existe pas de rivières navigables, on a creusé des canaux destinés à en tenir lieu. Habituellement l'eau d'un canal est à peu près stagnante, et alors sa surface est plane et horizontale. Quelquefois cependant l'eau coule dans le canal, avec une vitesse comparable à celle que l'on observe dans les rivières, et en conséquence *sa surface doit présenter* une inclinaison, ainsi que nous le

verrons bientôt : mais cette inclinaison est toujours ext faible. Il semble donc, au premier abord, qu'on ne puisse canal que dans un pays plat ; sans quoi le niveau de l'ea verait, dans certains cas, à une trop grande distance au-d la surface du sol environnant, ce qui présenterait de gra vénients de plusieurs sortes. Mais il n'en est rien : un c être établi dans un pays accidenté, tout aussi bien que da plat, et être disposé de manière que le niveau de l'eau so à une petite distance de la surface du sol voisin.

Pour arriver à ce résultat, on forme le canal de plusieur placées à la suite les unes des autres, et dans lesquelles de l'eau doit être différent ; et l'on réunit ces diverses partie *écluses*, qui sont destinées à faire passer les bateaux d'un un autre. Soient A, *fig*. 355, le bief supérieur, et B le bief

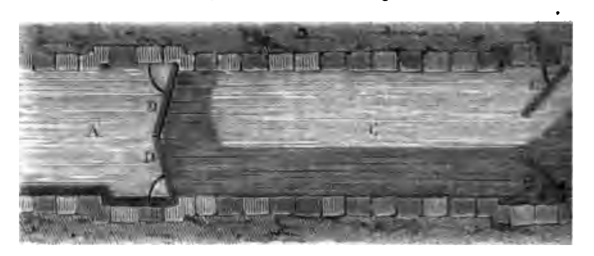


Fig. 355.

L'écluse consiste en un bout de canal C, qui est séparé d biefs A, B, par des portes D, E, susceptibles de s'ouvrir e fermer à volonté, et qui peut de cette manière être mis en c nication avec l'un ou l'autre de ces deux biefs. Les dimens l'écluse C, en largeur et en longueur, ont été choisies de m qu'elle puisse contenir les plus grands bateaux qui doivent n sur le canal. Quant à sa profondeur, elle doit être telle que teaux puissent y entrer, lorsque l'eau y est au niveau du bi ses parois doivent s'élever assez haut, pour ne pas être dé par le niveau de l'eau dans le bief A.

Pour faire passer un bateau du bief inférieur B dans le bi rieur A, on ferme les portes D, et l'on ouvre les portes E. L'ea au même niveau en B et en C, on peut amener le bateau à rieur de l'écluse. Alors on ferme les portes E, et l'on étal communication entre le bief supérieur A et l'écluse ; le de l'eau monte dans l'écluse, et fait monter le bateau

[redacted]

veau est devenu le même en C et en A, on ouvre les 'on peut faire passer le bateau dans le bief supérieur. me opération inverse qu'on fait passer un bateau de A tes E étant fermées, et les portes D ouvertes, le niveau n A et en C : on amène le bateau dans l'écluse, puis on rtes D. On fait alors baisser le niveau de l'eau dans ouvrant une communication qui permette au liquide de B, puis on ouvre les portes E, et enfin on fait passer B.

ue, chaque fois qu'un bateau traverse l'écluse, soit en it en descendant, on est obligé de faire couler, du bief ans le bief inférieur, la quantité d'eau que peut contenir re les niveaux de ces deux biefs. Lorsque plusieurs biefs à la suite les uns des autres, de plus en plus bas, et sont des écluses de mêmes dimensions, le passage d'un bane des extrémités du canal à l'autre extrémité, détermine l'écoulement de la quantité d'eau dont nous venons de ais le bief le plus élevé, jusqu'au bief le plus bas. Lorsl doit franchir une montagne, en s'élevant sur un des verabaissant sur l'autre versant, il existe vers la crête de la un bief situé au-dessus de tous les autres; c'est de ce it s'écouler la quantité d'eau nécessaire au passage des t que les bateaux montent d'un côté, soit qu'ils redescentre. Il faut donc que ce bief culminant soit alimenté, ou s d'eau, ou par les eaux pluviales qu'on accumule à cet 'immenses réservoirs. C'est pour diminuer autant qu'on erte d'eau qui résulte du passage des bateaux par les on donne à celles-ci les plus petites dimensions possibles. pendant elles cessent de pouvoir contenir les plus grands i marchent sur le canal.

ous avons dit que, lorsqu'un bateau avait été amené du ur B dans l'écluse C, on devait fermer les portes E, puis communication entre l'écluse et le bief supérieur A, niveau de l'eau devienne le même de part et d'autre D. On pourrait croire qu'il n'y a pas autre chose à faire r ces portes D; il est évident en effet que, si on les ouise s'emplirait, et le bateau serait élevé immédiatement lu bief supérieur. Mais si l'on y réfléchit, on verra qu'il êmement difficile d'ouvrir les portes D, avant que l'égaau fût établie de part et d'autre. Admettons, pour fixer que chaque porte ait 2 mètres de hauteur, et autant de elle est touchée dans toute sa hauteur par l'eau du bief

supérieur, et que le niveau de l'eau dans l'écluse ne l'attei
aucun point, elle aura à supporter de la part du liquide (§ 22
pression égale au poids d'un cylindre d'eau dont la base se
4 mètres carrés (surface de la porte), et dont la hauteur se
1 mètre (hauteur du niveau de l'eau, au-dessus du centre de g
de la surface pressée). Cette pression, qui sera de 4000^k, p
le même effet qu'une force de même intensité appliquée en u
de la porte situé sur la verticale qui passe par son milieu,
tiers de cette ligne à partir de son côté inférieur (§ 222). O
par là qu'on ne pourrait ouvrir la porte dont il s'agit, et v
la pression qui la maintient fermée, qu'en lui appliquant une
extrêmement grande. Pour que les deux portes puissent rés
une si énorme pression, on les construit avec une grande soli
on les dispose de manière qu'elles s'arc-boutent l'une contre l
lorsqu'elles sont fermées, *fig.* 355 ; par ce moyen, on voit q



Fig. 356.

portes ne pourraient céder à l'action du liquide qu'en écar
massifs de maçonnerie qui forment les deux côtés de l'éclu

Pour éviter d'avoir à vaincre la résistance extrêmement
dont nous venons de parler, on n'ouvre les portes d'écluse q
avoir amené le niveau à être le même sur leurs deux faces. E
fet, on ouvre d'abord une sorte de vanne qui ferme une ou
pratiquée vers la partie inférieure de chaque porte. Cette va
fixée à une crémaillère de fer, qui monte verticalement ju

de la porte : un pignon engrène avec cette crémaillère, et pignon est muni d'une manivelle. En faisant tourner la ma-, on soulève la vanne sans peine, *fig*. 356 ; l'eau du bief su- se précipite dans l'écluse par l'ouverture qui lui est ainsi ; le niveau de l'eau s'élève progressivement dans l'écluse, et 'il est devenu le même que le niveau dans le bief supérieur, t ouvrir les portes.

portes qui existent entre l'écluse et le bief inférieur présen- une disposition entièrement pareille, afin qu'on puisse faire r l'eau de l'écluse dans le bief inférieur, avant qu'on les ouvre.

281. Influence de l'air sur le poids d'un corps. — Tous rps qui nous environnent sont placés au milieu de l'air atmos- ique. Cet air exerce une pression sur chaque partie de leur ce ; ils se trouvent donc dans des conditions analogues à celles corps plongé dans un liquide. Aussi peut-on répéter dans ce le raisonnement du § 267, et l'on en conclura qu'un corps, é au milieu de l'air atmosphérique, perd une portion de son égale au poids de l'air qu'il déplace.

peut vérifier ce résultat par l'expérience suivante. Deux bou- cuivre, dont l'une est creuse, et l'autre pleine, ont été dispo- telle manière qu'étant suspendues aux extrémités d'un pe- de balance, *fig*. 357, elles se fassent bre, et que le fléau reste horizontal. On roduit le tout sous le récipient d'une ma- pneumatique, et on fait le vide. On voit que l'équilibre n'existe plus ; la boule , qui est plus grosse que l'autre, s'abaisse monter la boule pleine. Cela tient à ce chaque boule perdait dans l'air une portion son poids égale au poids de l'air qu'elle plaçait. La plus grosse des deux boules, plaçant plus d'air que l'autre, éprouvait en temps une plus forte diminution de ids qu'elle ; et puisque les poids des deux ules, ainsi diminués de quantités inégales, se faisaient équilibre en issent aux extrémités de deux bras de levier égaux, il s'ensuit que poids de la plus grosse des deux boules est réellement plus grand e celui de la petite. L'équilibre ne doit donc plus exister, lors- l'on retire l'air qui les enveloppe, et qu'on les soustrait ainsi à la ussée qu'il exerçait sur elles.

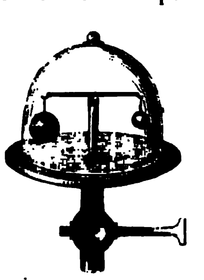


Fig. 357.

Lorsqu'on effectue des *pesées* destinées à fournir des résultats *une grande précision, il est* nécessaire de tenir compte de la dimi-



se maintenir dans la position qu'il occupe, sans tombe
effet que son poids soit précisément égal à la poussée
vironnant exerce sur sa surface. C'est ce qui arrive pou
qui ne se maintiennent à une certaine hauteur au-dess
que parce qu'ils sont soutenus par l'air. Si l'air atmos
anéanti, les nuages tomberaient à l'instant même, to
qu'une pierre ou une balle de plomb.

Si le poids d'un corps est moindre que le poids de l
place, la force qui tend à le faire monter l'emporte
tend à le faire descendre; il doit donc s'élever dans l
de même qu'un morceau de liége, qu'on a placé au mi
remonte à la surface, aussitôt qu'on l'abandonne à lui
de cette manière que nous voyons la fumée s'élever d
gaz, dont elle est en grande partie formée, se sont dil
tion de la chaleur, et il en résulte que sa densité est
que celle de l'air environnant, ou bien encore que son
faible que le poids de l'air qu'elle déplace.

Montgolfier eut l'idée de profiter de la force ascens
fumée, pour élever, dans l'atmosphère, des corps pes
des hommes. Il construisit pour cela une enveloppe
grande dimension, fermée de toutes parts, excepté à l
rieure, où elle présentait une ouverture circulaire; fa

[redacted]

nt à se faire élever eux-mêmes dans l'atmosphère. Les pre-
qui entreprirent ce voyage d'un nouveau genre sont Pilâtre
ziers et le marquis d'Arlandes. Leur montgolfière, *fig.* 358,



Fig. 358.

nifiquement ornée, se terminait inférieurement par une galerie
laire destinée à recevoir les voyageurs. Un réchaud était sus-
u intérieurement et à leur portée ; en sorte qu'ils pouvaient,
ant leur voyage, y jeter de temps en temps de la paille, dont
raient une provision, afin de rendre à leur machine la force
sionnelle que le refroidissement lui faisait perdre. Cette ascen-
mémorable eut lieu sans accident, le 21 novembre 1783, dans
din de la Muette, près Paris.

283. Au lieu *de remplir l'intérieur* du ballon avec de la fumée
l'air chaud, on peut y introduire un gaz naturellement plus

léger que l'air, tel que l'hydrogène. Cette idée, qui n Montgolfier, fut mise en pratique par Charles, qui en fit mière expérience publique à Paris, au Champ de Mars, k 1783. Le 1er décembre suivant, il s'éleva lui-même dans phère, accompagné de Robert, au moyen d'un ballon à gaz hy

Cette nouvelle espèce d'aérostats présente des avantages sur les montgolfières. D'une part, la légèreté relative du rieur n'a pas besoin d'être entretenue par un foyer pla bas ; et par suite on peut prolonger un voyage aérostati être obligé de porter avec soi une grande quantité tières combustibles, comme cela arrive lorsqu'on se s montgolfière. D'une autre part, la présence de ce f dessous d'une montgolf occasionner un incendie, effets seraient terribles : la sion de ce foyer est donc point de vue, d'une très gı portance.



Fig. 359.

Lorsqu'un ballon de ce est destiné à recevoir des v on l'enveloppe d'un filet s recouvre presque complét cepté à sa partie inférieur Ce filet se termine par des descendent tout autour, nent, au-dessous du bal celle où se placent les a

Si le ballon était con rempli de gaz à la press phérique, au moment et que ce gaz ne pût en aucun moyen, il pourrait en résulter de très graves a mesure que le ballon s'élève, il se place dans des couches phère où la pression de l'air est de plus en plus faible. que le ballon supporte extérieurement de la part de l' donc progressivement, tandis que la pression intérieur par la force élastique du gaz qui y serait renfermé ne pas d'intensité. L'enveloppe, qui était d'abord égalem sur ses deux faces, se trouverait donc alors soumise, de par à des pressions très différentes; cela pourrait détermine rures de cette enveloppe, ce qui permettrait au gaz de sort dance, et par suite obligerait bientôt le ballon à retomber

[redacted]

ur obvier à ces graves inconvénients, on peut employer deux ns différents. Le premier consiste à ne pas emplir complétement llon au moment du départ. Lorsqu'il s'élève, et que la pression supporte extérieurement diminue, le gaz qu'il contient se dilate, ballon se gonfle peu à peu : il est clair que, tant qu'il n'a pas pris tout le volume qu'il est susceptible de prendre, il n'y a pas à dre de déchirure occasionnée par un excès de pression inté- e. Le second moyen, qui est presque exclusivement adopté tenant, consiste à laisser une libre issue au gaz à la partie infé- e du ballon ; de telle manière que, le gaz communiquant constam- t avec l'air extérieur par cette issue, on ne doit pas avoir à crain- que la pression intérieure surpasse notablement celle du dehors. utre, dans l'un et l'autre cas, on a toujours soin de pratiquer, au net du ballon, une ouverture assez large, fermée par une sou- . Cette soupape, qu'un ressort maintient bien en contact avec bords de l'ouverture, peut être ouverte à l'aide d'une corde qui st attachée et qui descend jusqu'à la portée des voyageurs. n craint que la pression intérieure ne surpasse trop la pression rieure, soit que le ballon n'ait pas d'ouverture vers le bas, soit cette ouverture se trouve accidentellement insuffisante pour er sortir une quantité convenable de gaz, on ouvre la soupape, u'à ce qu'il se soit établi un équilibre de pression qui enlève e chance d'accident.

a force ascensionnelle d'un ballon entièrement gonflé diminue esure qu'il se trouve plus élevé dans l'atmosphère ; car l'air l déplace a une densité de plus en plus faible, et le poids de cet st en conséquence de plus en plus petit. Il est vrai que, comme s venons de le dire, une portion du gaz sort par l'ouverture qui ratiquée au bas du ballon, ou bien par la soupape supérieure, et amène une diminution correspondante dans le poids total du on : mais cette perte de poids ne compense pas la diminution poussée du fluide environnant. Il arrive bientôt un moment où rce ascensionnelle est complétement annulée, et le ballon reste s stationnaire dans la couche où il se trouve ; ou du moins il ne eut plus que dans le sens horizontal, emporté par le courant existe dans cette couche. Pour faire monter le ballon plus haut, llége la nacelle, en jetant du *lest*, c'est-à-dire du sable fin, dont soin de se munir en quantité convenable. Pour le faire des- lre, au contraire, on ouvre la soupape pendant quelque temps, le sort, le ballon se dégonfle ; et la poussée de l'atmosphère, qui inue plus *que ne fait le poids* du ballon, en raison de la perte de *devient insuffisante pour* le soutenir à la même hauteur.

§ 284. Il est aisé de calculer la force ascensionnelle d'un ba[illegible] d'après ses dimensions, son poids, et la nature du gaz dont o[illegible] remplit. Le poids d'un mètre cube d'hydrogène, à la températ[illegible] 0°, et sous la pression de 0m,76 de mercure, est de 89gr ; le poid[illegible] même volume d'air, dans les mêmes circonstances, est de 1[illegible] la force ascensionnelle d'un mètre cube d'hydrogène, placé a[illegible] lieu de l'air atmosphérique, est donc de 1210gr. Pour tro[illegible] force ascensionnelle d'un ballon gonflé avec l'hydrogène, on d[illegible] donc multiplier 1210gr par le nombre de mètres cubes de gaz [illegible] aura employés, et retrancher du produit le poids du ballon [illegible] même, avec le filet et la nacelle : on jugera ainsi de la grande[illegible] poids dont la nacelle pourra être chargée, sans que le ballon [illegible] de pouvoir s'élever.

Si l'on remplit le ballon de gaz hydrogène carboné serva[illegible] l'éclairage, comme on le pratique habituellement, à cause de [illegible] plus grande facilité de se procurer ce gaz, on ne pourra charger [illegible] nacelle que d'un poids beaucoup plus faible. La densité de ce gaz [illegible] pris dans le gazomètre, est très variable, parce que sa compositi[illegible] n'est pas toujours la même ; mais on peut la regarder en moye[illegible] comme étant les 0,53 de celle de l'air. Un mètre cube de gaz d'éclairage, dans les mêmes circonstances de température et de pressio[illegible] que ci-dessus, pèse donc environ 688gr ; et la force ascensionnelle dont il est animé, lorsqu'il est placé au milieu de l'air atmosphérique, est d'environ 611gr. En multipliant cette force par le nombre de mètres cubes de gaz employés, et retranchant du produit le poids du ballon, du filet, et de la nacelle, on aura encore la mesure du poids que le ballon peut enlever. On voit que la force ascensionnelle d'un mètre cube de gaz d'éclairage est à peu près la moitié de celle d'un même volume d'hydrogène.

PRINCIPES RELATIFS AU MOUVEMENT DES FLUIDES.

§ 285. **Écoulement d'un liquide par un orifice.** — Lorsqu'un liquide est en équilibre dans un vase, et qu'on vient à pratiquer une ouverture dans la paroi du vase, au-dessous de la surface libre du liquide, l'équilibre est troublé. La portion de paroi qui a été enlevée, pour produire l'ouverture était plus pressée à l'intérieur qu'à l'extérieur, en raison de sa distance verticale à la surface libre du liquide ; elle résistait à cette pression, et maintenait ainsi le liquide dans l'immobilité : mais aussitôt qu'elle est enlevée, le liquide, qui n'est plus retenu par rien, se précipite par l'orifice qui lui est offert.

Au moment où l'écoulement commence, les molécules liquides

[redacted]

ent immobiles un instant auparavant, ne traversent l'orifice . une très petite vitesse ; cette vitesse d'écoulement augmente ssivement, et finit au bout de très peu de temps par atteindre ndeur qu'elle ne dépasse plus. Alors l'écoulement devient r ; les molécules liquides qui sont à l'intérieur du vase sont n mouvement pour se rapprocher de l'orifice ; chacune d'elles . chemin particulier, et prend généralement une vitesse de plus grande, jusqu'à ce qu'elle soit arrivée à l'orifice. Si l'on re les diverses molécules liquides qui marchent à la suite les es autres, en suivant le même chemin, ces molécules consti- se que l'on nomme un *filet liquide*.

héorie indique que la vitesse avec laquelle le liquide traverse e, lorsque le mouvement est devenu régulier, ne dépend pas direction de la portion de paroi dans laquelle cet orifice a été né. Que l'écoulement se produise de haut en bas, *fig.* 360, ou s en haut, *fig.* 361, ou latéralement, 62, la vitesse de cet écoulement doit rs être la même. La théorie fait voir de ue cette vitesse est égale à celle qu'ac- ait un corps pesant, en tombant librement hauteur égale à la distance verticale AB surface libre du liquide au-dessus de l'o- En sorte que, si l'on désigne par h cette ur AB exprimée en mètres, et par v la e d'écoulement, on aura (§ 87)



Fig. 360.



$$v = \sqrt{2gh}.$$

formule donnera la vitesse en mètres ; à-dire qu'elle fera connaître le nombre de s que parcourrait chaque molécule li- en une seconde, si elle continuait à se mouvoir avec la même té pendant ce temps, à partir du moment où elle a traversé e. Nous avons donné précédemment (§ 88) les résultats nu- ues qui se déduisent de la formule, pour un grand nombre de s de la hauteur h.

86. On peut vérifier par l'expérience que la vitesse d'écoule- d'un liquide est bien celle que la théorie indique. Lorsque lement a lieu de bas en haut, comme dans la *fig.* 361, on ob- que le jet liquide qui se produit au-dessus de l'orifice à peu près jusqu'au niveau du liquide dans le vase. Il ne n *être ainsi qu'autant que les* molécules qui traversent l'ori- *coulement sont lancées* avec une vitesse égale à celle qui

est due à la hauteur du niveau du liquide au-dessu
Pour que l'expérience se fasse d'une manière plus c
bon que le jet liquide s
cliné ; sans cela les mol
après s'être élevées ju
grande hauteur qu'elles p
dre, retomberaient sur
suivantes, et diminuerai
quence leur vitesse asc
du liquide ne s'élèverai
toute la hauteur qui c
vitesse d'écoulement. E
jet un peu obliquement
bien d'une petite quantit
laquelle chaque molécu
lever en vertu de sa v
(§ 106) ; mais cet inconvénient sera plus que compensé
de faire décrire une parabole à chaque molécule,
ainsi qu'en retombant elle ne vienne arrêter les m
suivent.



Fig. 361.

Lorsque l'écoulement a lieu latéralement, par un
dans une paroi verticale, *fig.* 362, le jet liquide p
d'une parab
qu'il forme
chose que ce
rait un corp
horizontalem
vitesse égal
possède le li
tant du vase
jet liquide d
voir servir à
tion de la vit
ment. Pour
rera la distar
CD d'un poi
rabolique, à la verticale qui passe par l'orifice, et la
niveau AD de l'orifice et du point C. Le temps
une molécule liquide, pour aller de A en C, est pré
à celui qu'elle emploierait à tomber verticalement
AD (§ 104). Si AD est égal à $\frac{1}{2}$ g, ou à $4^m,9$, ce t
1 seconde ; il sera de $\frac{1}{2}$ seconde, $\frac{1}{3}$ de seconde, $\frac{1}{4}$ d

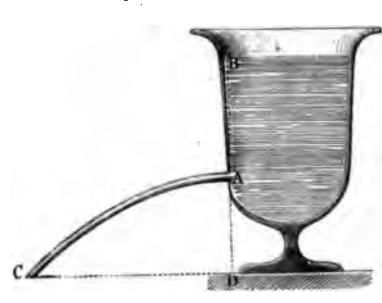


Fig. 362.

est égal à $\frac{1}{4}$, ou $\frac{1}{9}$, ou $\frac{1}{16}$,....., de $4^m,9$. Admettons, pour
les idées, que l'on ait choisi le point C sur le jet parabo-
de manière que AD soit égal à $\frac{1}{9}$ de $4^m,9$, c'est-à-dire égal à
: une molécule liquide aura mis $\frac{1}{3}$ de seconde pour aller de
. Mais si la pesanteur n'avait pas agi sur elle depuis le mo-
elle est sortie de l'orifice, elle se serait mue horizontalement,
ouvement uniforme, et aurait ainsi parcouru une distance
CD en $\frac{1}{3}$ de seconde (§ 104): donc la vitesse avec laquelle
t du vase est égale à 3 fois la longueur CD. En déterminant
moyen la vitesse d'écoulement d'un liquide, pour diverses
s du niveau supérieur au-dessus de l'orifice, on trouve que
itesse est bien à très peu près égale à celle que donnerait la
$v = \sqrt{2gh}$, dans ces différents cas.

7. La quantité de liquide qui traverse l'orifice pendant une
, ou ce que l'on nomme la *dépense*, dépend à la fois de la
ur de l'orifice, et de la vitesse d'écoulement. Si le liquide,
sortie du vase, était soustrait à l'action de la pesanteur, et
ouvait qu'en vertu de sa vitesse acquise, la quantité de ce
qui sort pendant une seconde formerait un cylindre ayant
hauteur la vitesse d'écoulement. En regardant l'orifice comme
la base de ce cylindre, on voit qu'on aurait la dépense en
pliant l'aire de cet orifice par la vitesse d'écoulement. Or il est
que la dépense ainsi obtenue convient aussi bien au cas où le
le continue à être soumis à l'action de la pesanteur, après avoir
sé l'orifice : car les conditions de l'écoulement ne doivent pas
modifiées par les circonstances diverses dans lesquelles peut se
er le liquide, après qu'il a quitté le vase. Si, par exemple, l'aire
rifice est de 2 centimètres carrés, et qu'il se trouve à $0^m,50$
ssous du niveau dans le vase, la dépense devra être égale à
4 centimètres cubes ($2 \times 313,2$) ; car la vitesse due à une hau-
de $0^m,50$ est de $3^m,132$ ou bien 313,2 centimètres (§ 88).
l'orifice d'écoulement a été pratiqué dans une paroi mince, la
tité de liquide qui s'écoule réellement en une seconde est de
coup inférieure à celle que l'on trouve par le moyen qui vient
e indiqué ; la *dépense effective* n'est guère que les 0,62 de la
se *théorique*, c'est-à-dire de la dépense obtenue en multipliant
de l'orifice par la vitesse d'écoulement. Voyons à quoi doit être
uée cette différence considérable.

us avons dit que, si le liquide était soustrait à l'action de la
nteur, après sa sortie du vase, la quantité de ce liquide qui sort
nt une seconde *formerait un cylindre ayant pour hauteur la
e d'écoulement*; puis nous avons évalué le volume de ce cy-

lindre, en regardant sa base comme étant égale à l'orifice. C'est ce dernier point que nous avons commis une erreur: la notre cylindre liquide est très notablement plus petite que l'avons supposé. Les différents filets liquides, à l'intérieur convergent vers l'orifice d'écoulement; leur convergence raît pas brusquement au moment où ils l'atteignent: elle encore jusqu'à une certaine distance au delà. Il en résulte veine fluide ne présente pas, à son origine, la figure d'un cy elle se contracte d'abord, puis bientôt devient sensiblement drique. Ce que nous devons prendre pour la base du cylindre nous avons parlé plus haut, ce n'est donc pas l'aire de l' mais l'aire de la *section contractée* de la veine fluide. On comp là comment il se fait que la dépense effective soit si diff la dépense théorique, telle que nous l'avions trouvée. Cep malgré l'erreur que nous avons commise dans notre raisonne pour arriver à trouver la quantité de liquide qui s'écoule dans seconde, nous conserverons, suivant l'usage, le nom de dép théorique au produit de l'aire de l'orifice par la vitesse d'écoule du liquide.

Des mesures prises sur différentes veines fluides, sortant d'ori circulaires percés en minces parois, ont fait reconnaître qu'on p adopter en moyenne les résultats suivants. Si le diamètre de l'orifice, *fig.* 363, est divisé en 10 parties égales, le diamètre de la section contr contiendra 8 de ces parti et la distance *ef* de c section à l'orifice en c tiendra 5. L'aire de la s tion contractée est moyennement les 0,61 l'aire de l'orifice; et si l' multiplie cette aire par la vitesse de l'écoulement, on trouvera un résultat qui sera sensiblement le même que celui qui est fourni par la mesure directe de la quantité de liquide écoulée.

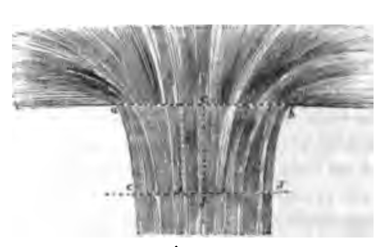


Fig. 363.

§ 288. A partir de la section contractée, la veine liquide prend des formes diverses, suivant la direction dans laquelle se fait l'écoulement; considérons spécialement une veine verticale, correspondant à un orifice pratiqué à la partie inférieure d'un vase. Nous avons dit que la veine liquide, après s'être contractée d'une ma-

[redacted]

ble, jusqu'à une petite distance de
evient ensuite sensiblement cylin-
n réalité cela n'arrive pas exacte-
r la veine dont nous nous occu-
sections transversales de cette
inuent toujours, à mesure qu'elles
plus loin de l'orifice; la veine liquide
:te toujours, jusqu'au moment où
ise en gouttes. Mais cette contrac-
xiste dans toute la longueur de la
due à une tout autre cause que
se produit tout près de l'orifice:
eaucoup moins sensible que cette
n initiale, et à l'inspection de la
listingue très bien le point où finit
ı commence l'autre.

us rendre compte de la manière
rme de la veine se modifie d'un
autre, imaginons que des molé-
es sortent successivement de l'ori-
des vitesses égales, et qu'elles se
à des intervalles de temps égaux
t, d'un dixième de seconde, par
Ces molécules descendront toutes
même verticale, et la distance de
tre elles ira constamment en aug-
puisque leurs vitesses augmentent,
acune d'elles emploiera toujours le
mps, un dixième de seconde, pour
ndre la place qu'occupe la suivante.
oulement du liquide, les quantités
sortent de l'orifice, pendant chaque
de seconde, sont égales entre elles;
antités d'eau se séparaient, de ma-
faire des gouttes isolées, elles des-
nt en s'éloignant progressivement les
autres, comme le faisaient les mo-
solées dont nous venons de parler.
masses d'eau qui sortent ainsi suc-
ent de l'orifice, pendant chaque
de seconde, ne se quittent pas; elles
dhérentes les unes aux autres, de ma-



Fig. 634.

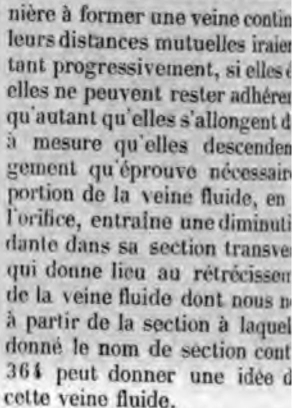


Fig. 365.

nière à former une veine contin
leurs distances mutuelles iraien
tant progressivement, si elles é
elles ne peuvent rester adhéren
qu'autant qu'elles s'allongent d
à mesure qu'elles descenden
gement qu'éprouve nécessair
portion de la veine fluide, en
l'orifice, entraine une diminuti
dante dans sa section transve
qui donne lieu au rétrécissem
de la veine fluide dont nous n
à partir de la section à laquel
donné le nom de section cont
364 peut donner une idée d
cette veine fluide.

S'il n'existait pas de cause
qui vinssent modifier la form
fluide verticale, telle que nou
trouver, cette veine s'allonger
en s'effilant de plus en plus, e
une grande distance de l'orif
diviserait en gouttes. Mais hab
se produit, sur la surface de
ondes pareilles à celles qu'on o
surface d'une eau tranquille, s
a laissé tomber une pierre. Ce
nent lieu à des renflements et à c
ments successifs de la veine,
mouvements vibratoires des mo
des, qui déterminent ces renfl
trécissements, les font d'aill
mieux ressortir, que la veine li
mince ; et bientôt il arrive qu'e
mouvements vibratoires, les r
la veine se séparent et forment
En évitant autant que possible
vibrations des molécules liquid
une veine qui reste continue da
longueur ; en produisant au con
brations dans l'air qui envir
fluide, à l'aide d'un instrumen

[redacted]

exemple, on voit la veine se raccourcir beaucoup, et se diviser gouttes à peu de distance de l'orifice d'écoulement.

Les considérations analogues à celles qui viennent d'être dévelop-s pour les veines verticales descendantes peuvent être appli-es aux veines verticales ascendantes. On reconnaît ainsi une pareille veine fluide, après s'être contractée à la sortie de ifice, en raison de la convergence des filets liquides qui la ment, se dilate ensuite peu à peu, à cause de la diminution de sse qu'éprouvent successivement les molécules liquides, à me-e qu'elles s'élèvent. Quant aux vibrations dont nous avons parlé, qui ont une grande influence sur une veine descendante pour la iser en gouttes, elles ne produisent que peu d'effet sur une veine endante : parce que sa section transversale, augmentant au lieu diminuer à mesure qu'elle s'éloigne de la section contractée, st jamais assez petite pour que l'effet de ces vibrations devienne n sensible.

§ 289. Ce que nous avons dit, relativement à la vitesse d'écoule-ent d'un liquide par un orifice, s'applique indistinctement au cas l'écoulement aurait lieu dans le vide, et au cas où il se produi-it dans l'atmosphère ; la vitesse d'écoulement sera toujours la me, quelle que soit la pression exercée sur la surface libre du uide dans le vase, pourvu que la veine liquide, à sa sortie de rifice, soit soumise extérieurement à la même pression. Mais la esse sera très différente de celle que nous avons indiquée, si les essions ne sont pas égales sur la surface libre du liquide et à l'o-fice.

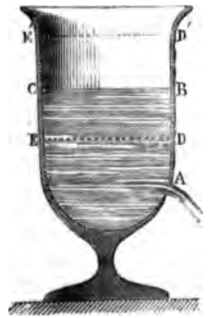


Fig. 366.

Si la pression est plus grande à l'orifice A e sur la surface BC du liquide, *fig.* 366, xcès de la première pres- n sur la seconde vra être inférieur à la pression que pro-irait une colonne de liquide qui aurait ur hauteur la distance verticale de l'orifice à la surface BC ; sans cela le liquide ne urrait pas couler par cet orifice. Menons nc dans le vase un plan horizontal DE, ué au-dessous du plan BC, à une telle stance de ce plan, que le poids d'une co-nne de liquide, comprise entre ces deux ans, et ayant pour base l'unité de surface, it égal à l'excès de pression dont il s'agit. liquide n'étant animé que d'un mouvement très lent dans le se, *en raison de la petitesse* que nous supposons toujours à

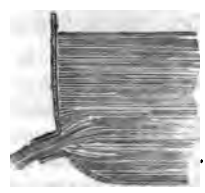


soumis à des pressions égales. Ainsi la vitesse d'éc
bien encore représentée par la formule $\sqrt{2gh}$, po
prenne pour h la hauteur du plan DE au-dessus de l'
Si la pression est plus faible sur l'orifice A, que su
du liquide, on peut concevoir que l'excès de pressio
face BC soit produit par un liquide de même nature
est dans le vase, disposé au-dessus de cette surface, e
a une surface libre D'E', située à une hauteur conve
lement se produit donc de la même manière que si l
du liquide, au lieu d'être en BC, et de supporter
pression que l'orifice, était en D'E', et supportait la
que l'orifice. La formule $\sqrt{2gh}$ donnera donc en
d'écoulement du liquide, pourvu que h désigne la dis
de l'orifice au niveau idéal D'E'.

On voit, par ce qui précède, qu'une diminution ou
tion de pression sur la surface libre du liquide dans
que la pression sur l'orifice change, entraîne une
une augmentation dans la vitesse d'écoulement du l
contraire, une diminution ou une augmentation d
l'orifice, sans changement de pression sur la surface li
détermine une augmentation ou une diminution corres
la vitesse d'écoulement.

[redacted]

ous maintenant d'étudier les modifications que
ıulement d'un liquide par un orifice, en raison de
ıensions de l'ajutage dont cet orifice est muni.
ƺe adapté à l'orifice est cylindrique, *fig.* 367,
.voir lieu de deux manières
ɪn la veine liquide traver-
ıns en toucher les parois;
aversera en mouillant ses
ɜur étendue. Dans le pre-
; se passent exactement de
fice était percé en mince
ɜ contracte d'abord, puis
ent cylindrique : elle ne
oute la capacité intérieure
'on pourrait enlever sans modifier l'écoulement
ɐ. Dans le second cas, qui se produit habituelle-
ıide a une forme toute différente de celle qu'elle
ıjutage; l'adhérence du liquide avec les parois
emplir toute la capacité intérieure de l'ajutage :
eu de se contracter, comme elle ferait si l'ori-
mince paroi, prend donc immédiatement la forme
ıt pour base l'orifice d'écoulement lui-même.


Fig. 367.

le liquide qui s'écoule pendant une seconde, par
rique dont le liquide mouille les parois, on trouve
augmentée considérablement par l'effet de l'aju-
iron les 0,82 de la dépense théorique (§ 287);
ɛcoulement avait eu lieu par un orifice percé en
ı'en aurait été que les 0,62. On conçoit aisément
augmentation de dépense. Nous avons vu que, si
ɾe est de beaucoup inférieure à la dépense théo-
où l'écoulement a lieu par un orifice percé en
ient à ce que la veine fluide se contracte, et qu'en
ɛction transversale, après la contraction, est très
petite que l'orifice qu'elle a traversé. L'ajutage
pour effet immédiat de s'opposer à la contraction
tout naturel que sa présence détermine une aug-
nse. La cause d'erreur, en vertu de laquelle la dé-
ait trop forte (§ 287), disparaît ici complétement.
se demander pourquoi la dépense effective, dans
ɘ cylindrique, n'est pas égale à la dépense théo-
le n'en est que les 0,82. Cela tient à ce que l'aju-
s seulement la section transversale de la veine,



paroi, parce que l'on doit prendre pour base du c
la section contractée de la veine, et non pas l'ori
cylindrique ramène la base du cylindre liquide à êt
fice d'écoulement ; mais en même temps il diminue l
cylindre. Cependant la hauteur du cylindre liquide
nuée dans le rapport dans lequel sa base est augn
résulte une augmentation réelle de dépense.

Il nous reste maintenant à indiquer la cause de la
l'ajutage cylindrique apporte dans la vitesse d'écoule
Nous avons dit que la contraction de la veine liqu
d'un orifice percé en mince paroi, était due à la c
filets liquides, au moment où ils se présentent à l'orifi
qu'ils ne perdent complétement qu'à une certaine d

L'ajutage cylindrique, en s'opposant à la contract
oblige les filets liquides à changer brusquement de
sitôt qu'ils traversent l'orifice. Ces filets sont donc
mêmes conditions que s'ils éprouvaient un choc, qu
pliqué de manière à produire ce changement brusq
Or nous avons vu que les chocs donnent générale
pertes de travail (§ 113). Les molécules liquides
elles viennent de pénétrer dans l'ajutage, ne doiven
toute la vitesse qu'elles auraient eue sans cette cir

[redacted]

la pression atmosphérique. C'est ce qu'on reconnaît laptant à l'ajutage un tube de verre C, qui se recourbe, ;er dans un vase contenant du mercure: pendant on voit le mercure monter et s'y maintenir à une cer- au-dessus du niveau exté- ge du liquide dans l'ajutage ıu à une sorte de succion rois, qui fait monter le le tube C, comme si l'on xtrémité supérieure de ce



Fig. 368.

détails dans lesquels nous er, sur l'effet produit par lindrique, vont nous aider ce qui se passe, quand un le par des ajutages de di-

conique convergent, *fig.* 369, a une influence plus nde sur l'écoulement du liquide, suivant que, pour ;ueur, il y a une différence plus ıde entre les diamètres de ses n a cherché par l'expérience levait avoir un pareil ajutage, égalité d'orifice de sortie AB, la plus grande possible. On a que les deux arêtes opposées ıe devaient être inclinées l'une ın angle de 13 à 14 degrés; :ette donnée que la *fig.* 369 ite. En employant un pareil

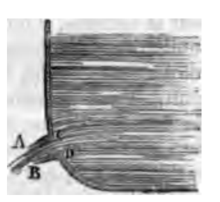


Fig. 369.

btient une dépense effective qui est les 0,95 de la ıque correspondant à l'orifice de sortie AB. On se aisément de ce résultat, en observant que, d'une liquide ne doit se contracter que d'une petite quan- de l'orifice AB, puisque les filets liquides ne sont onvergents; et que, d'une autre part, la perte de vi- iquide doit éprouver, en raison de ce que les filets squement de direction à leur entrée dans l'ajutage, ment moindre que dans le cas d'un ajutage cylindri- e changement de direction de ces filets est moins pro-

Si l'on adapte un ajutage conique divergent à un ori *fig.* 370, et que le liquide le traverse en mouillant ses p dépense obtenue peut être plus grande que la dépense t correspondant à cet orifice. Ce rés gulier peut s'expliquer de la man vante. A mesure que le liquide l'intérieur de l'ajutage, il travers tions de plus en plus grandes ; il s'étaler progressivement, puisqu l'ajutage en totalité ; et par suite doit diminuer, à mesure qu'il s'ap son extrémité. Cette diminution doit être produite par une forc en sens contraire du mouvement. Or cette force retar peut provenir que des pressions que le liquide suppo pesanteur n'agit aucunement sur le liquide contenu d tage, pour modifier sa vitesse, si cet ajutage a son ax tal. Le liquide est soumis à la pression atmosphéri sortie de l'ajutage; il éprouve d'ailleurs une pressio contraire, de la part du liquide qui sort du vase et qu la section AB : donc il faut que la première pression sur la seconde, d'une quantité assez grande pour produi nution de la vitesse du liquide qui a lieu dans toute la de l'ajutage. Ainsi le liquide, en s'écoulant par l'orifice porte, à son passage par cet orifice, une pression plus la pression atmosphérique, qui s'exerce sur la surface le vase : cette différence des pressions, sur la surfa à l'orifice AB, doit faire prendre au liquide une vitesse ment plus grande que celle qu'il prendrait si les pressio égales (§ 289). Il y a bien une perte de vitesse, due au c brusque de direction des filets liquides, au moment où il dans l'ajutage ; mais cette perte est plus que compensée mentation qu'éprouve la vitesse, en raison de la diminuti sion qui a lieu à l'entrée de l'ajutage.



Fig. 370.

Il est à peine nécessaire d'ajouter que, si la dépens produite par un ajutage conique divergent est plus gra dépense théorique correspondant à l'orifice d'entrée, contraire beaucoup plus petite que celle qui correspond de sortie. La perte de vitesse, résultant de ce que les éprouvé un changement brusque de direction à leur e l'ajutage, se fait sentir ici ; et la quantité de liquide q l'orifice de sortie de l'ajutage est moindre que si les f

[redacted]

fice de sortie, sans éprouver de changement brusque :tion.

u'on veut utiliser la vitesse avec laquelle un liquide n orifice, pour produire certains effets, pour faire exemple, une roue hydraulique, il est important les pertes de vitesse qui sont occasionnées par les rusques de direction des filets liquides. Si l'on pou- l'orifice dans une paroi sans épaisseur, ces pertes pas. Mais la paroi sairement une épais- pour résister à la a à supporter; l'o- ratiquera sera donc es conditions qu'un mince paroi, qu'on l'un ajutage. Pour de vitesse qui pour- lu passage du liquide , on en arrondit les érieur du réservoir, te manière, les filets ngent que progressivement de direction, et ils sortent ec toute la vitesse que peut déterminer la hauteur essus de l'orifice. Dans ce cas on dit que l'orifice

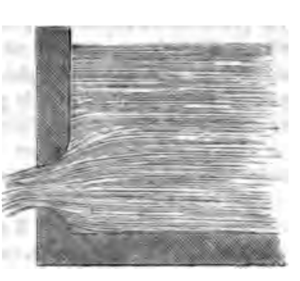


Fig. 371.

m. —On donne le nom de *siphon* à un tube recourbé '2, à peut n li- se M, ase N sans erture is du c les- de est com- mplir tube is on

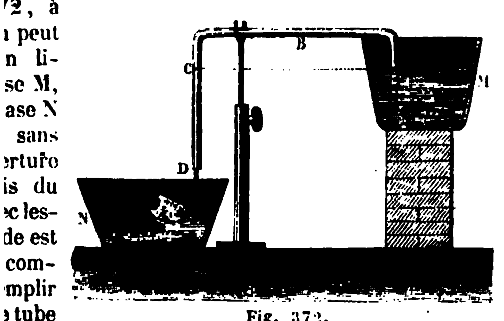


Fig. 372.

ne l'*indique la figure*. On voit alors le liquide s'é- *émité D du siphon*; le vase M se vide de plus en



plonge dans le vase, et au niveau de cette surfac
égale à la pression atmosphérique. Si l'on s'élève
partir de là, jusque dans la partie supérieure B,
pressions de plus en plus faibles, en raison de la
se sera élevé : la pression en B, par exemple, sera
sion atmosphérique diminuée du poids d'une co
dont il s'agit, ayant pour base l'unité de surface,
distance verticale du point B au-dessus de la surfa
dans le vase M. Si ensuite on continue à marche
en descendant le long de la seconde branche, on t
sions de plus en plus grandes ; arrivé en C, au niv
libre du liquide dans le vase M, on retrouvera une
la pression atmosphérique. Si l'on continue à des
sions qu'on rencontrera augmenteront encore : e
D, on trouvera que la pression supportée par la f
petit piston qui ferme l'extrémité du tube est é
atmosphérique augmentée du poids d'une colonne
pour base l'unité de surface et pour hauteur la
du point D au-dessous du point C, ou, ce qui est la
dessous du niveau du liquide dans le vase M. Le p
supporte inférieurement la pression atmosphérique
pressé de haut en bas que de bas en haut, et il s

uide contre les parois intérieures du siphon, comme nous le s bientôt.

ur que le siphon puisse fonctionner, il est nécessaire que l'on dans l'atmosphère. Sans la pression atmosphérique, qui s'exerce liquide en M, ce liquide ne monterait pas de A en B. Si l'on it dans le vide, le liquide qu'on aurait introduit d'abord dans la longueur du siphon, pour l'*amorcer*, se diviserait en deux s au point le plus élevé du tube; une portion descendrait par nche de gauche, et l'autre par la branche de droite. On comra de la même manière, que si le siphon présentait de trop les dimensions, dans le sens vertical, il ne fonctionnerait pas, qu'il fût placé dans l'atmosphère, car on sait que la pression sphérique ne peut pas déterminer l'ascension d'un liquide à hauteur plus grande que celle d'une colonne de ce liquide qui it équilibre (§ 253).

ur qu'un siphon puisse être facilement amorcé, on lui adapte be latéral, qui s'embranche sur lui tout près de l'extrémité D, i remonte verticalement, à côté de la branche CD. Lorsque le on est installé dans la position qu'il doit occuper pendant l'écount du liquide, sans avoir été préalablement amorcé, on ferme rémité D à l'aide d'un bouchon, puis on aspire par l'extrémité rieure du tube latéral dont on vient de parler. Cette aspiration luisant une diminution de pression de l'air qui est contenu à térieur du siphon et qui ne communique pas au dehors, il en lte que le liquide du vase M monte de A en B, et redescend ende B en D. Le siphon est alors amorcé: et il suffit d'ôter le chon qu'on avait mis en D, pour que l'écoulement ait lieu. C'est qu'on opère souvent pour vider un tonneau plein de vin, sans r besoin de percer un trou dans un des fonds: le siphon dont on rt dans ce cas, est de fer-blanc, et est construit de manière à trer facilement par la bonde, en laissant encore tout autour de n libre passage pour l'air qui doit remplir le tonneau à mesure le vin en sort.

291. Écoulements constants. — Pour que la vitesse avec lale un liquide s'écoule par un orifice reste constamment la même, it que la charge sur cet orifice ne varie pas, c'est-à-dire que la ace libre du liquide, dans le réservoir d'où il s'écoule, reste tous à une même hauteur au-dessus de l'orifice. Nous avons vu 58) un moyen qu'on peut employer pour atteindre ce but. Un e moyen, dont on pourra se servir lorsqu'on aura à opérer sur quantités de liquide beaucoup plus considérables, consiste à arriver une source de liquide dans le réservoir, et à pratiquer

dans sa paroi une échancrure latérale correspondant a constant qu'on veut que le liquide y prenne; si la sourc mente le réservoir fournit plus de liquide qu'il ne doit s'é par l'orifice, l'excédant sortira par cette échancrure, et le variera pas. Ce dernier moyen est souvent employé en gr régulariser la vitesse d'écoulement de l'eau qui est desti mouvoir les roues hydrauliques.

§ 295. **Écoulements intermittents.** — La *fontain tente*, représentée ici, *fig.* 373, est un appareil disposé de ma duire un é intermitter A contient se termine ment par fices B, B, p cette eau p ler. Ce vas munique pa mosphère p tie supérie il est trave tube vertic est ouvert bouts, et qu communiqu vase A ave phère. A de cette co tion, la pr mosphériqu librement contenue da A; celle-ci par les orifices B, B, et tombe dans la cuvette E. Cette cu percée d'un trou O, par lequel l'eau s'écoule dans une cuvette placée au-dessous de la première. Mais l'orifi laisse pas sortir autant d'eau qu'il en arrive dans la c en sorte que le niveau du liquide s'y élève, et vien fermer l'extrémité inférieure D du tube, qui permettait l sion atmosphérique de s'exercer sur l'eau du vase A. l'écoulement par les orifices B, B, ne s'effectue plus mêmes conditions. La pression exercée par l'air qui



Fig. 373.

n A diminue peu à peu, à mesure que l'eau continue à ler. puisque cet air, actuellement isolé de l'atmosphère, occupe ume de plus en plus grand. La vitesse d'écoulement par les s B, B, doit donc diminuer progressivement; et bientôt l'eau era tout à fait, lorsque l'excès de la pression atmosphérique pression que supporte l'eau dans le vase A sera capable de quilibre à la colonne d'eau située au-dessus des orifices B, B. itesse de chacun de ces orifices fait d'ailleurs que l'eau ne as couler dans une partie de sa largeur, pendant que l'air rait par l'autre partie : l'écoulement cesse donc complétement. 'eau qui s'est accumulée dans la cuvette E en sort toujours rifice O : et comme cette eau n'est plus renouvelée, son niveau , ce qui fait que bientôt l'extrémité inférieure D du tube ver- D va se trouver dégagée. Alors l'air atmosphérique commu- ra de nouveau avec l'intérieur du vase A, l'écoulement re- encera par les orifices B, B, et le niveau de l'eau remontera dans vette E. La communication de l'atmosphère avec l'intérieur du A étant de nouveau interceptée, l'écoulement par les orifices , s'arrêtera bientôt, et ainsi de suite. L'écoulement se produira d'une manière intermittente, tant que le vase A contiendra de l.

296. Il existe dans diverses localités des fontaines naturelles ne fournissent de l'eau que d'une manière intermittente. Nous voir comment il est possible de se rendre compte de ce phé- ène.

maginons qu'on ait disposé un vase, *fig.* 374, de telle façon que ond soit traversé par un tube de verre re- é en forme de siphon. Si l'on verse de dans ce vase, elle s'y maintiendra tant a surface libre AB ne se sera pas élevée à la partie supérieure C du siphon. L'air sphérique pénétrant librement par la partie eure de la grande branche du siphon, l'eau oduira dans la petite branche, et s'y pla- au même niveau que dans le vase. Mais tôt que la surface libre de l'eau dans le s'élèvera au-dessus du point le plus élevé siphon, l'eau qui s'est introduite à son ieur coulera dans la grande branche ; le si- sera amorcé, et le vase se videra, jusqu'à ce que le niveau le l'eau se soit abaissé au-dessous de l'extrémité inférieure de tite branche du siphon.

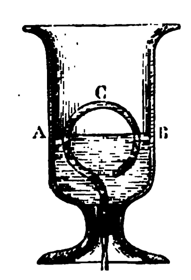


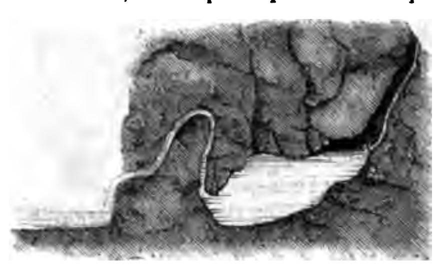
Fig. 374.

On peut encore disposer cet appareil autrement, *fig.* 3
plaçant le tube recourbé par un simple tube droit, ouve
bouts, que l'on recouvre d'un autr
large et fermé par le haut. L'ense
deux tubes constitue une sorte de s
le tube intérieur est la grande bran
la petite branche est formée par l'es
laire compris entre la surface extér
premier tube et la surface intérieure
Si l'on verse de l'eau dans le vase, el
tiendra encore, tant que sa surface A
dessous de l'extrémité C du tube inté
aussitôt que le niveau aura dépassé l
extrémité, l'eau qui remplit déjà l
nulaire compris entre les deux tube
dans le tube intérieur; le siphon sera amorcé, et le vas
complétement.



Fig. 375.

Pour obtenir un écoulement intermittent, à l'aide de l'u
appareils dont il vient d'être question, il suffira de fa
dans le vase un petit filet d'eau qui coule sans interrupti
se remplira peu à peu; la surface de l'eau AB s'y élever
sivement; bientôt le siphon s'amorcera, et le vase se vid
que le niveau de l'eau se sera ainsi suffisamment abaissé
ne pourra plus fonctionner; il se videra lui-même. Alors
remplira de nouveau, et l'écoulement par le siphon ne r
cera que lorsque la surface de l'eau se sera élevée de no
qu'en C. Il est clair que, pour qu'on obtienne ainsi un é
intermittent, il faut que la quantité d'eau qui sort par le
plus grand
qui arrive
temps dan
et qui tend
plir; sans
siphon ne
pas le vase
terait co
amorcé.


Fig. 376.

Les fon
termittent
les peuven
duites par une disposition particulière du terrain, ayant d
avec celle des appareils dont nous venons de parler. Conce

[redacted]

iste à l'intérieur de la terre, *fig.* 376, et qu'elle se rem-
au peu à peu, soit par des infiltrations lentes, soit par un
d'eau qui y est amené par une petite fissure du terrain.
ns de plus que cette cavité communique au dehors par un
troit, qui se relève d'abord, pour s'abaisser ensuite, de
i former une sorte de siphon. L'eau s'accumulera dans cette
isqu'à ce que son niveau se trouve à la hauteur du point le
é de ce conduit. De nouvelles quantités d'eau arrivant, le
amorcera, et l'eau s'écoulera au dehors. Bientôt le siphon
et cessera de fonctionner, et la cavité intérieure se rem-
nouveau, jusqu'à ce que le siphon s'amorce et recommence
Pour que le siphon puisse ainsi vider ce réservoir intérieur,
essaire que la surface de l'eau y soit soumise à la pression
érique (§ 293), et que l'air extérieur puisse y pénétrer faci-
pendant que l'eau en sort; cette condition se trouvera très
nt remplie, en raison des fissures nombreuses qui existent
ment dans les terrains, et dans lesquelles l'air atmosphé-
répand librement. La disposition qui vient d'être indiquée
pouvant donner lieu à une fontaine intermittente n'exige
oncours d'un grand nombre de conditions spéciales; on
très bien qu'elle se soit présentée dans plusieurs localités,
ul effet du hasard.

7. **Fontaine de Héron.** — Lorsqu'on fait sortir le liquide
dans un vase par une ouverture disposée de manière à
un jet vertical, comme dans la *fig.* 361 (page 416), il ne
s jaillir plus haut que le plan horizontal correspondant à la
libre du liquide dans le vase. Mais il n'en est plus de même
ce liquide est divisé en deux portions, entre lesquelles est
ée une masse gazeuse: le jet liquide peut s'élever, dans
à une hauteur beaucoup plus grande que celle qui est déter-
ar la surface libre dans le réservoir. C'est ce que l'on com-
sans peine, à l'aide de l'appareil connu sous le nom de *fon-
Héron* (Héron, l'inventeur de cet appareil, vivait à Alexan-
s l'an 120 avant J.-C.). Celui qui est représenté ici, *fig.* 377,
ose d'un simple tube de verre recourbé, dont une extrémité
git en entonnoir, et qui présente deux renflements B, C,
onction de réservoirs. Si ce tube recourbé contenait seule-
l'eau, et que le liquide s'élevât dans la branche de droite,
dans l'entonnoir A, comme l'indique la figure, il devrait
dans la branche de gauche à la même hauteur, car le tube
erait, à proprement parler, un système de vases communi-
Mais supposons que l'eau ne s'étende que de A en B; qu'au-

dessus de la surface de l'eau dans la boule B, et jusque dan
C, il y ait une certaine quantité d'air ; puis que le reste
partir de cette bo
rempli d'eau. La p
cet air, entre les d
d'eau, modifiera
ment le résultat. L
de l'eau, en B et
partie des parois d
fermée dans laqu
est contenu ; il ex
en vertu de sa fo
sive, des pressions
divers points de ce
faces, si toutefois
son poids, qui e
négligeable. La pr
portée par la surf
dans la boule C
même que celle qu
duite par une col
pesant directeme
surface, et ayant
égale à la différen
de l'eau en A et e
conclure de là qu
qui part de la par
de la boule C et
verticalement, a
sez grande longu
maintiendrait en
une hauteur, a
niveau en C, éga
la surface de l'e
dessus du nivea
que, de plus, s
pas une longue
pour que l'équi
duise, l'eau jailli

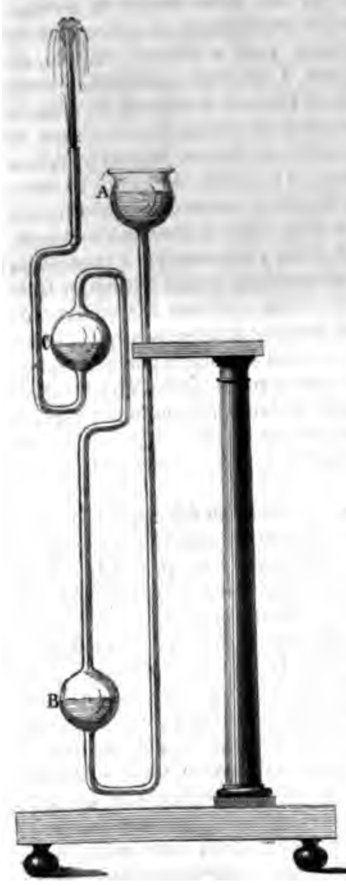


Fig. 377.

vant à une hauteur qui approchera de celle qui convi
équilibre, comme le montre la figure.

§ 298. **Mouvement des liquides dans des tu**

[redacted]

ıle dans un tuyau, en le remplissant complétement, il
ırt des parois du tuyau une résistance qui diminue
esse. Pour se rendre compte de la manière dont se
sistance, il faut observer que les molécules liquides
les parois développent ainsi un frottement qui ra-
vement; les molécules voisines des premières, se
es d'une vitesse plus grande qu'elles, donnent lieu
loppement d'un frottement qui tend à accélérer le
premières molécules, et à ralentir celui des autres,
e. En sorte que, si l'écoulement du liquide est de-
n peut concevoir que ce liquide soit formé de diverses
res qui s'enveloppent les unes les autres, en s'éten-
la longueur du tuyau, et qui se meuvent chacune
e propre. La première couche, qui enveloppe toutes
celle dont la vitesse est la plus petite; la seconde
eu plus vite; la troisième, plus vite encore; et enfin
s intérieure, qui se réduit à un simple filet liquide,
ssède la plus grande vitesse. Le glissement de cha-
ıches, à l'intérieur de celle qui l'enveloppe, détermine
qui tend à diminuer la vitesse de la première et à
de la seconde. Chaque couche est donc soumise à
s, dont l'un, agissant sur sa surface extérieure, tend
ıouvement, et l'autre, agissant sur sa surface inté-
contraire à l'accélérer; mais le premier frottement
second, et la couche se trouve en définitive soumise
e qui tend à diminuer sa vitesse. C'est en raison de
tances, qui agissent sur les diverses couches, que
le de liquide qui coule dans le tuyau est diminuée.
rès ce que nous venons de voir, les vitesses des di-
es liquides qui traversent une même section trans-
ıu ne sont pas les mêmes; ces vitesses sont de plus
s, pour des molécules de plus en plus éloignées des
au centre de la section qu'est placée la molécule
est la plus grande. La quantité de liquide qui tra-
dont nous parlons dans l'espace d'une seconde, est
ces vitesses différentes. Si l'écoulement se produi-
ınière que toutes les molécules liquides aient une
et que le liquide se meuve comme tout d'une pièce,
le volume du liquide qui traverse une section trans-
u en une seconde, en multipliant la surface de cette
vitesse du liquide; ou bien encore, si l'on divisait
quide écoulé en une seconde, par la surface de la

section transversale du tuyau, on trouverait la vitesse du liquide. Dans la réalité, les vitesses des diverses molécules liquides n'étant pas les mêmes, on ne peut pas calculer de la même manière le volume du liquide qui passe, en une seconde, par une section transversale du tuyau. Si l'on divise le volume du liquide qui s'est écoulé en une seconde par la surface de cette section transversale, on trouvera un nombre qui ne représentera plus la vitesse des diverses molécules liquides, puisqu'elles ont des vitesses différentes; mais ce nombre représentera une vitesse moyenne, la vitesse que devrait avoir le liquide, se mouvant tout d'une pièce, pour donner lieu à la même *dépense* (§ 287) : c'est ce que l'on nomme, dans ce cas, la vitesse du liquide, dans la section que l'on considère. Si, par exemple, la surface de la section transversale du tuyau est de 3 décimètres carrés, et qu'il s'écoule dans une seconde 24 litres de liquide, ou 24 décimètres cubes, on dira que la vitesse du liquide, dans cette section, est de 8 décimètres par seconde.

§ 300. Si le tuyau dans lequel se meut le liquide présente partout la même section transversale, la vitesse du liquide sera la même dans les diverses sections que l'on peut imaginer le long de ce tuyau. Car la quantité totale de liquide comprise entre deux de ces sections ne devant pas varier, il est nécessaire que le volume du liquide qui entre dans cet espace par l'une des sections soit égal à celui du liquide qui en sort par l'autre section ; ce qui ne peut exister qu'autant que les vitesses sont les mêmes dans ces deux sections. Les diverses molécules liquides sont donc, chacune séparément, animées d'un mouvement uniforme ; et en conséquence les forces qui sont appliquées à chacune d'elles doivent se faire équilibre. Si, au lieu de prendre une seule molécule, on prend la masse liquide comprise entre deux sections transversales du tuyau, menées à une petite distance l'une de l'autre, on voit qu'il devra encore y avoir équilibre entre toutes les forces appliquées à cette masse liquide. Or ces forces sont de trois espèces différentes : 1° Si l'axe du tuyau, dans la partie où est placée notre masse liquide, est incliné à l'horizon, elle se trouvera comme sur un plan incliné, et soumise en conséquence à une des composantes de son poids, qui agira dans le sens de l'axe du tuyau, et qui tendra à la faire descendre (§ 63) ; 2° les pressions que la masse liquide supporte sur les deux faces planes par lesquelles elle est en contact avec le liquide voisin, pressions qui sont dirigées en sens contraire l'une de l'autre, donneront lieu à une force unique, égale à leur différence, et agissant dans le sens de la plus grande ; 3° enfin les frottements divers dont nous avons parlé, entre les diverses couches

qui glissent les unes dans les autres, donneront lieu à une force unique agissant toujours en sens contraire du mouvement du liquide. La première de ces trois forces agira dans le sens du mouvement, si le liquide descend dans la partie inclinée du tuyau où nous l'avons supposé placé; elle agira en sens contraire du mouvement, si le liquide monte; enfin elle sera nulle, si la portion de tuyau où se trouve le liquide est horizontale. La deuxième force agira dans le sens du mouvement, ou en sens contraire, suivant que la pression exercée sur la face postérieure de la masse liquide sera plus grande ou plus petite que la pression exercée sur sa face antérieure; elle sera nulle, si ces deux pressions sont égales. Puisque la troisième force, celle qui résulte des frottements des couches liquides les unes sur les autres et contre les parois du tuyau, est toujours dirigée en sens contraire du mouvement, il faut que l'une des deux premières au moins agisse dans le sens du mouvement; car sans cela les trois forces auxquelles la masse liquide est soumise ne pourraient se faire équilibre. Dans tous les cas, il faut que la somme des deux forces qui agiront dans un sens soit égale à la force qui agira dans le sens opposé.

§ 301. Quand on observe l'écoulement d'un liquide dans un tuyau, on peut trouver facilement la grandeur et le sens de chacune des deux premières forces dont nous venons de parler, relativement à la tranche de liquide qui est comprise entre deux sections déterminées du tuyau. Pour la première, on évaluera le volume du liquide contenu entre ces deux sections; on en conclura son poids; et l'on décomposera ce poids en deux composantes dirigées, l'une suivant l'axe du tuyau, l'autre suivant une perpendiculaire à cet axe (§ 63): la première composante sera la force cherchée. Pour la seconde, on déterminera la pression supportée par chacune des deux faces de la tranche liquide (§ 221), en implantant, sur le tuyau, des tubes de verre qui s'élèvent verticalement en deux points correspondant respectivement à chacune de ces deux faces, et mesurant la hauteur à laquelle le liquide se maintiendra dans chaque tube, par suite de la pression qui existe à son extrémité inférieure dans le tuyau. La condition d'équilibre qui a été énoncée précédemment, entre les trois forces auxquelles la tranche liquide est soumise, permettra donc de trouver la grandeur de la troisième force, c'est-à-dire de la résistance occasionnée par les frottements.

Des expériences nombreuses ont fait reconnaître que, pour une même vitesse du liquide, la résistance dont il s'agit est proportionnelle à l'étendue de *la surface par laquelle la tranche touche les parois du tuyau. Il en résulte que*, pour des tranches prises dans un

même tuyau, et occupant des longueurs différentes de ce tuyau, la résistance est proportionnelle à la longueur de la portion de tuyau dans laquelle se trouve la tranche; il en résulte encore que des tranches de même longueur et animées d'une même vitesse, étant prises dans des tuyaux différents, la résistance est proportionnelle au contour de la section transversale qui sert de base à chaque tranche.

Lorsque la vitesse du liquide varie, la résistance produite par les frottements varie aussi, contrairement à ce qui arrive dans le frottement de deux corps solides l'un sur l'autre (§ 126). A égalité de surface de contact d'une tranche liquide avec les parois du tuyau, la résistance qu'éprouve cette tranche est d'autant plus grande que la vitesse du liquide est plus considérable. Quant à la loi suivant laquelle la résistance varie avec la vitesse, on peut se la représenter en admettant que cette résistance est la somme de deux forces, dont l'une est proportionnelle à la vitesse du liquide, et l'autre proportionnelle au carré de cette vitesse. En sorte que, si la vitesse devient double, triple, quadruple..., de ce qu'elle était d'abord, la résistance supportée par la tranche liquide variera dans un rapport plus grand que celui des nombres 2, 3, 4...: mais elle ne variera pas dans un rapport aussi grand que leurs carrés 4, 9, 16...

§ 302. La pression qui a lieu à l'intérieur du liquide qui coule uniformément le long d'un tuyau varie généralement d'une section transversale à une autre. La quantité dont elle varie est déterminée par la condition d'équilibre de la tranche liquide comprise entre ces deux sections transversales. Supposons, par exemple, qu'il s'agisse d'un tuyau droit AB, *fig.* 378, par lequel s'écoule uniformément

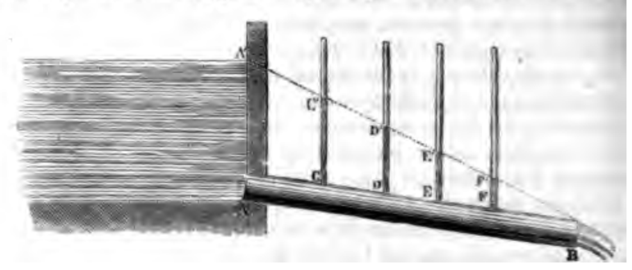


Fig. 378.

l'eau d'un réservoir. Si nous comparons les pressions qui ont lieu aux points C, D, E, F, à l'intérieur du tuyau, nous reconnaîtrons

[redacted]

t proportionnellement aux distances CD, DE, EF, e ces points. Imaginons pour cela des sections trans- lans le liquide par les points C, D, E, F. Les tranches E, EF ont des poids proportionnels à leurs longueurs; s de ces poids, dans le sens de l'axe du tuyau, sont nnelles à leurs longueurs, puisque le tuyau est droit, équence son inclinaison est partout la même. D'un résistances qu'éprouvent ces diverses tranches dans it sont également proportionnelles aux longueurs des ıyau contre lesquelles elles frottent (§ 301). Donc, lition de l'équilibre entre les forces qui agissent sur s tranches (§ 300), les différences des pressions qui 's extrémités doivent être proportionnelles aux lon- ıches ; les différences des pressions en C et en D, en E et en F, doivent être dans le même rapport que les DE, EF. Si les distances CD, DE, EF sont égales pression variera autant de C en D, que de D en E,

:r les pressions qui ont lieu aux divers points C, D, E, F, lanter des tubes de verre qui s'élèvent verticalement, avons déjà indiqué (§ 301). L'excès de la pression, que de ces points, sur la pression atmosphérique, sera hauteur à laquelle l'eau s'élèvera dans le tube de ndant. Il est aisé de conclure de ce qui précède que C', D', E', F', des colonnes d'eau que l'on obtiendra ituées sur une ligne droite. De plus cette ligne droite, isamment, devra passer par l'extrémité du tuyau, A', situé sur la surface libre de l'eau du réservoir, au-dessus de l'origine A du tuyau. C'est ce que l'ex- me complétement.

ets des coudes et des étranglements. — Souvent tinés à la conduite des liquides présentent des coudes s où leur direction doit changer. Ces coudes, analo- :s tuyaux de poêle, occasionnent toujours de grandes mouvement des liquides qui doivent les traverser. ı les filets liquides arrivent dans un coude, ils doi- brusquement de direction ; ce changement brusque on de la vitesse des molécules entraîne toujours une il, ainsi que nous l'avons déjà observé à l'occasion de tage cylindrique (§ 290). Il en résulte donc que, pour *ouvement d'un liquide*, avec une vitesse donnée, dans *contient des coudes*, il faudra employer une plus

grande quantité de travail que si ces coudes n'existaient pas. A
pour éviter les pertes de travail, qui sont des conséquences n
saires de cette disposition, doit-on faire en sorte que le change
de direction des filets liquides ne s'opère que progressivemen
pour cela, au lieu de raccorder les deux portions de tuyau de
directions sont différentes, en les réunissant au moyen d'un c
il faut les relier l'une à l'autre par un tuyau courbe, dont la c
bure ne soit pas trop grande. En arrondissant ainsi le chemi
doit parcourir le liquide, on ramènera la résistance qui s'opp
son mouvement à être sensiblement la même que si le tuyau
une même direction dans toute sa longueur.

Si le tuyau, dans lequel circule un liquide, présente inté
rement un étranglement brusque, le passage du liquide pa
étranglement occasionne encore une perte de travail, qui est
lement due au changement brusque qu'éprouve la vitesse des m
cules liquides, changement qui porte plutôt sur la grandeur de
vitesse que sur sa direction. La résistance occasionnée pa
rétrécissement intérieur du tuyau serait beaucoup moindre, si c
trécissement se produisait peu à peu, de manière à modifier prog
sivement la vitesse des molécules liquides; car cette vitesse
être d'autant plus grande, que la section du tuyau, au point o
trouvent ces molécules, devient plus petite. Cependant le rétréci
ment, tout en se faisant sentir peu à peu, donnera toujours li
une plus grande résistance que s'il n'existait pas. Car, d'une p
le liquide y prend une vitesse plus grande que dans le reste
tuyau; d'une autre part, une même masse liquide touche les p
rois sur une étendue de surface d'autant plus grande que le d
mètre du tuyau est plus petit : donc, pour cette double raison,
frottements qu'éprouve le liquide (§ 301) sont augmentés par la p
sence du rétrécissement du tuyau. On voit par là qu'il faut évi
avec soin de faire couler les liquides par des passages étroits, a
de ne pas donner lieu aux pertes de travail qui en résulteraient;
que, si l'on ne peut pas faire autrement, il faut disposer les p
rois entre lesquelles le liquide doit se mouvoir, de manière à
déterminer que progressivement le changement que doit éprou
la vitesse des molécules liquides, lorsqu'elles sont obligées de trav
ser des étranglements.

§ 304. Nous avons dit précédemment (§ 140) que, dans certa
circonstances exceptionnelles, on a besoin d'augmenter l'action
résistances passives qui se développent dans le mouvement, af
modérer la vitesse des corps qui se meuvent. Quand il s'agit
liquide qui coule dans un tuyau, on y parvient en produisan

ge un étranglement plus ou moins prononcé. Pour cela, on
oser sur le tuyau un robinet tellement construit que, lors-
tourné convenablement, son ouverture se raccorde avec
r du tuyau; en sorte que le liquide s'écoule, en tra-
e robinet, exactement de la même manière que s'il n'exis-
Lorsqu'ensuite on voudra modérer l'écoulement du liquide,
de tourner un peu le robinet, *fig*. 379 ; son ouverture ne
dant plus avec les
oisines du tuyau,
ltera un étrangle-
usque, qui donnera
ne diminution de
se des molécules li-
L'effet produit ainsi
utant plus marqué que le robinet aura été tourné d'une plus
quantité.



Fig. 379.

peut employer encore un autre moyen, qui consiste à disposer
upape à gorge à l'intérieur du tuyau. Ce n'est autre chose
disque circulaire, fixé à un axe qui traverse le tuyau transver-
ent, et qui s'applique sur la surface du disque de manière à
der avec un de ses diamètres. En faisant tourner cet axe sur
ême, on fait tourner en même temps le disque, qui peut pren-
insi des positions différentes à l'intérieur du tuyau.
n place ce disque de manière que son plan soit per-
iculaire à l'axe du tuyau, il s'applique sur tout son
ur contre les parois, et ferme entièrement le pas-
du liquide. Si au contraire le plan du disque est
é à avoir la même direction que l'axe du tuyau, il
ésente que sa tranche au liquide, qui peut passer
ent de chaque côté; dans ce cas, la présence du
e ne rétrécit pas beaucoup l'espace offert au pas-
lu liquide. En donnant au disque des positions in-
diaires entre celles dont nous venons de parler, on
ira un rétrécissement plus ou moins grand, qui en-
ra une diminution correspondante dans la vitesse du
e. On a des exemples de soupapes à gorge dans les
de poêle, *fig*. 380, dont on se sert pour modérer en cas de
n le mouvement ascendant de la fumée dans le tuyau.



Fig. 380.

105. **Jets d'eau.** — Nous avons dit (§ 286) que, lorsqu'un
le s'écoule par un orifice percé de manière à produire un jet
al dirigé *de bas en haut*, ce jet s'élève à peu près jusqu'au
du liquide dans le réservoir. C'est en cela que consiste le prin-



son mouvement à être sensiblement la même que
une même direction dans toute sa longueur.

Si le tuyau, dans lequel circule un liquide, p
rement un étranglement brusque, le passage du
étranglement occasionne encore une perte de tra
lement due au changement brusque qu'éprouve la
cules liquides, changement qui porte plutôt sur la
vitesse que sur sa direction. La résistance occ
rétrécissement intérieur du tuyau serait beaucoup
trécissement se produisait peu à peu, de manière à
sivement la vitesse des molécules liquides; car
être d'autant plus grande, que la section du tuya
trouvent ces molécules, devient plus petite. Cepend
ment, tout en se faisant sentir peu à peu, donner
une plus grande résistance que s'il n'existait pas.
le liquide y prend une vitesse plus grande que d
tuyau; d'une autre part, une même masse liquide
rois sur une étendue de surface d'autant plus gr
mètre du tuyau est plus petit : donc, pour cette d
frottements qu'éprouve le liquide (§ 304) sont augm
sence du rétrécissement du tuyau. On voit par là
avec soin de faire couler les liquides par des pass
de ne pas donner lieu aux pertes de travail qui en

sage un étranglement plus ou moins prononcé. Pour cela, on poser sur le tuyau un robinet tellement construit que, lorsé tourné convenablement, son ouverture se raccorde avec ur du tuyau; en sorte que le liquide s'écoule, en tra-ce robinet, exactement de la même manière que s'il n'exis-t. Lorsqu'ensuite on voudra modérer l'écoulement du liquide, de tourner un peu le robinet, *fig*. 379; son ouverture ne rdant plus avec les voisines du tuyau, ultera un étrangle-rusque, qui donnera une diminution de se des molécules li-. L'effet produit ainsi 'autant plus marqué que le robinet aura été tourné d'une plus quantité.

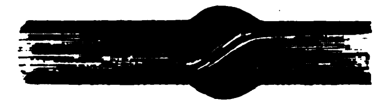


Fig. 379.

peut employer encore un autre moyen, qui consiste à disposer upape *à gorge* à l'intérieur du tuyau. Ce n'est autre chose disque circulaire, fixé à un axe qui traverse le tuyau transver-nt, et qui s'applique sur la surface du disque de manière à ler avec un de ses diamètres. En faisant tourner cet axe sur me, on fait tourner en même temps le disque, qui peut prendi des positions différentes à l'intérieur du tuyau. place ce disque de manière que son plan soit per-ulaire à l'axe du tuyau, il s'applique sur tout son r contre les parois, et ferme entièrement le pas-u liquide. Si au contraire le plan du disque est à avoir la même direction que l'axe du tuyau, il ente que sa tranche au liquide, qui peut passer ent de chaque côté; dans ce cas, la présence du ne rétrécit pas beaucoup l'espace offert au pas-du liquide. En donnant au disque des positions in-diaires entre celles dont nous venons de parler, on ira un rétrécissement plus ou moins grand, qui en-ra une diminution correspondante dans la vitesse du le. On a des exemples de soupapes à gorge dans les de poêle, *fig*. 380, dont on se sert pour modérer en cas de n le mouvement ascendant de la fumée dans le tuyau.

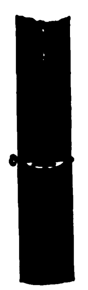


Fig. 380.

305. **Jets d'eau.** — Nous avons dit (§ 286) que, lorsqu'un le s'écoule par un orifice percé de manière à produire un jet al dirigé de bas en haut, ce jet s'élève à peu près jusqu'au *u du liquide dans le réservoir*. C'est en cela que consiste le prin-



de donner au tuyau de conduite un assez grand d
diminue la vitesse de l'eau dans le tuyau, et l'on
temps l'étendue de la portion de paroi qui est touc
masse de liquide (§ 301). On détermine ordinair
du tuyau de manière que l'eau n'y ait pas une
2 ou 3 décimètres par seconde.

Si l'orifice d'écoulement était muni d'un ajuta
les filets liquides, en changeant brusquement leur
sulterait encore une diminution très notable dan
Un ajutage cylindrique, par exemple, diminue l
ment d'un liquide dans le rapport de 1 à 0,82 (§
laquelle le liquide peut s'élever verticalement, en
à la sortie de l'ajutage, n'est donc que les 0,67 (0
0,82), ou environ les $\frac{2}{3}$ de celle à laquelle il s'él
était pratiqué en mince paroi. Pour ne pas nui
jet, on devra pratiquer l'orifice dans une plaque d
ou bien construire un orifice évasé (§ 292). Mais
deux dispositions est préférable, eu égard à la be
dité de la colonne liquide ascendante, qui seraien
de l'adhérence des filets liquides avec les parois

La hauteur à laquelle l'eau jaillit est encore dimi
tance de l'air, et aussi par la chute du liquide, q
teint la plus grande hauteur à laquelle il pouvait

'eau sort des divers orifices est la même pour tous : les
iés qui en résultent prennent donc la forme de paraboles
spondent toutes à une même vitesse de projection (§ 406).
ide horizontale varie d'un jet à un autre, suivant la direc-
orifice qui donne naissance au jet ; la plus grande ampli-
espond au jet dont la direction initiale fait un angle de
l'horizon, et cette amplitude est double de la hauteur à
élève verticalement le jet central.

Puits artésiens. — Il existe dans la terre, à des pro-
plus ou moins grandes au-dessous du sol, des nappes
ne très grande étendue. L'eau y est généralement en mou-
et cela constitue de véritables courants souterrains. Lors-
rce un puits assez profond pour atteindre de pareilles
l'eau, le liquide s'élève dans le puits, ordinairement jusqu'à
e, et souvent il se produit un jet vertical à une hauteur
moins grande au-dessus de la surface du sol. Les puits de
portent le nom de *puits artésiens*. Ce nom leur vient de ce
dans l'Artois, ancienne province de France, qu'on s'en
ipalement occupé dans les temps modernes ; mais il n'est
eux que ces puits n'aient été connus dans l'antiquité : on
ouvé dans les oasis d'Égypte, qui doivent remonter à des
très reculées.

se rendre compte complétement des phénomènes que l'on
dans les puits artésiens, il faut se rappeler que l'écorce
est généralement formée, dans le voisinage de sa surface,
nd nombre de couches superposées. Ces couches, de di-
atures, ont souvent une étendue très grande. Leur épais-
s être constante pour chacune d'elles, présente cependant
de régularité ; et si cette épaisseur diminue ou augmente
rtie à une autre d'une couche, ce n'est que progressive-
s différentes couches superposées qui constituent un ter-
donc séparées les unes des autres par des surfaces qu'on
rder comme sensiblement parallèles entre elles. Mais ces
de séparation, qui ont dû être horizontales dans leurs di-
nts, lors de la formation des couches, ont généralement
déformations par suite des mouvements géologiques que
es ont éprouvés ultérieurement. Il en résulte qu'actuelle-
couches sont ordinairement inclinées, et que cette incli-
rie d'un point à un autre.

ons maintenant qu'un terrain soit formé de couches su-
s, *fig.* 381, comme nous venons de le dire, et que parmi
hes il s'en trouve une AA dans laquelle l'eau puisse se

mouvoir facilement ; cette couche sera formée de sabl
ple, ou bien de matières qui présentent un grand nomb

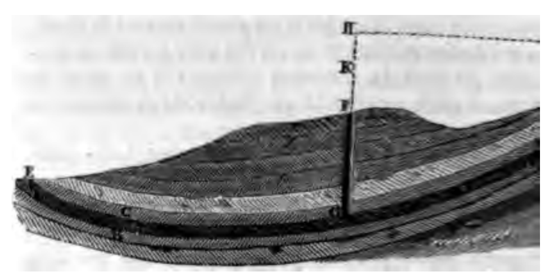


Fig. 381.

Concevons de plus que cette couche soit comprise e
tres BB, CC, qui se laissent difficilement traverser
mieux encore qui soient tout à fait imperméables. Si
quantité d'eau s'introduit dans la couche AA, elle circ
interstices que présentent les matières dont cette co
posée ; mais elle ne pourra en sortir, ni en traversant
rieure, ni en traversant sa face inférieure : elle sera
l'intérieur de la couche AA par la présence des deux co
qui forment comme deux barrières qu'elle ne peut pas

Les points où la couche AA se termine seront
situés sur la surface du sol : ce sont les points où ell
cette surface, et que l'on nomme ses affleurements.
se meuvent à la surface du sol, telles que les eaux de
encore les eaux des ruisseaux et des rivières, peuvent
dans la couche AA par ses affleurements ; en sorte qu
doit être habituellement pleine d'eau. Si les affleu
couche étaient tous exactement à un même niveau,
contiendrait serait à l'état d'équilibre, et formerait un
immobile. Mais il n'en est jamais ainsi : il existe touj
affleurements d'une couche, certains points qui so
que d'autres. Si l'eau extérieure s'infiltre dans la c
points situés à un niveau supérieur à celui des affle
plus bas, elle ne pourra plus s'y maintenir en équili
nécessairement par ces affleurements ; il se produira
rant continuel à l'intérieur de la couche : l'eau entre
sortira de l'autre.

Soit D, fig. 381, le point d'entrée de l'eau dans la

au point de sortie. Si l'on vient à percer en F un puits vertical FG, jusqu'à la couche AA, l'eau du courant souterrain montera dans ce puits, et pourra jaillir au-dessus de l'orifice F. Supposons d'abord qu'on ait adapté à cet orifice un tuyau vertical d'une grande hauteur, dans lequel l'eau soit obligée de rester, sans pouvoir s'écouler au dehors. Si aucune partie des affleurements de la couche AA ne se trouvait au-dessous du point d'entrée D, l'eau monterait dans le tuyau jusqu'au point H, situé au niveau du point D, en vertu du principe de l'équilibre d'un liquide dans des vases communiquants. Mais si l'eau, entrant par le point D, sort par le point E situé plus bas que le premier, elle ne peut pas s'élever dans le tuyau jusqu'en H ; sa surface libre s'arrêtera en un point K, inférieur au point D et supérieur au point E. Le puits FG et le tuyau qui le surmonte jouent ici, par rapport à la couche dans laquelle existe le courant souterrain, le même rôle que les tubes de verre implantés aux points C, D, E, F, du tuyau AB, *fig.* 378 (page 438). On voit par là que le point K, *fig.* 381, qu'on peut appeler le *niveau d'équilibre* du puits artésien FG, sera d'autant plus bas que ce puits sera plus près du point de sortie E du courant souterrain ; en sorte que, ainsi qu'on l'a observé plusieurs fois, le niveau d'équilibre peut être très différent, pour des puits artésiens peu éloignés les uns des autres, et aboutissant à une même nappe d'eau.

Le niveau d'équilibre du puits FG étant toujours supposé en K, si l'on n'adapte pas de tuyau à l'orifice de ce puits, l'eau jaillira au-dessus du sol, mais elle sera loin de s'élever jusqu'au point K. Pour que l'eau pût jaillir ainsi jusqu'à son niveau d'équilibre, il faudrait que rien ne s'opposât au mouvement qu'elle tend à prendre sous l'action de la pression qu'elle éprouve à la partie inférieure du puits. Mais c'est ce qui ne peut avoir lieu : en s'élevant à l'intérieur du puits, qui est habituellement étroit et profond, elle développe des frottements qui retardent son mouvement, et elle ne peut prendre qu'une vitesse très inférieure à celle qu'elle prendrait sans ces frottements.

Si l'on adapte à l'orifice du puits un tuyau qui ne s'élève pas jusqu'au niveau d'équilibre K, l'eau montera dans ce tuyau et s'écoulera par sa partie supérieure. La vitesse de l'écoulement sera d'autant plus faible que l'extrémité supérieure du tuyau sera plus rapprochée du point K. La quantité d'eau fournie par le puits diminuera donc de plus en plus à mesure qu'on cherchera à la faire monter plus haut à l'aide d'un pareil tuyau; et elle finira par devenir nulle, si l'on veut la faire monter jusqu'au niveau d'équilibre.

On ne donne ordinairement aux puits artésiens que de petites dimensions transversales : ce sont des trous cylindriques de quelques décimètres de diamètre, et d'une profondeur quelquefois très grande, que l'on creuse à l'aide d'outils de diverses formes, adaptés soit à l'extrémité d'une tige de fer qu'on allonge ou qu'on raccourcit à volonté, soit simplement à l'extrémité d'une corde. Ces puits doivent généralement être munis, dans une grande partie de leur profondeur, sinon dans la totalité, d'un tuyau de revêtement destiné à prévenir les éboulements des parois. On peut citer comme exemple remarquable de puits artésien celui que la ville de Paris a fait creuser à l'abattoir de Grenelle, à une profondeur de 546 mètres, et dont l'eau s'élève, dans un tuyau, à une hauteur de 37 mètres au-dessus du sol.

§ 307. Pour déterminer le niveau d'équilibre d'un puits artésien, il n'est pas nécessaire d'adapter à son orifice un tuyau vertical qui s'élève jusqu'au-dessus de ce niveau ; ce moyen, qu'il serait très difficile d'employer dans certains cas, peut être remplacé par le suivant. On fermera complétement l'orifice du puits à l'aide d'un tampon qu'on maintiendra solidement pour résister à la pression que l'eau exercera sur sa face inférieure ; puis on adaptera à une ouverture ménagée dans ce tampon un tuyau communiquant à un manomètre (§§ 260 et 261). L'air du tuyau, comprimé par l'eau du puits qui s'y introduira, pressera à son tour le mercure du manomètre ; et la pression ainsi produite pourra être évaluée en atmosphères. Si l'on retranche une unité du nombre d'atmosphères ainsi obtenu, et que l'on multiplie 10^{m},33 (§ 245) par le reste de la soustraction, on aura en mètres la hauteur du niveau d'équilibre du puits au-dessus de son orifice. On voit en effet que la pression exercée par l'eau sur la face inférieure du tampon, pression qui est mesurée par le manomètre, est précisément celle qui soutiendrait une colonne d'eau s'élevant jusqu'au niveau d'équilibre, dans le cas où le puits, n'étant plus fermé, serait muni d'un tuyau d'une hauteur convenable. La pression dont il s'agit ferait équilibre à cette colonne d'eau et à la pression atmosphérique qui s'exercerait sur sa surface supérieure : elle sera donc de 2, de 3, de 4,... atmosphères, suivant que la hauteur du niveau d'équilibre au-dessus de l'orifice du puits sera de 1 fois, 2 fois, 3 fois,... 10^{m},33.

Il arrive souvent que la quantité d'eau fournie par un puits artésien diminue. Cette diminution peut être attribuée à deux causes : ou bien à ce que le courant souterrain n'exerce plus une aussi grande pression à l'extrémité inférieure du puits, ou bien à ce que l'intérieur du puits s'est obstrué par des éboulements ou par l'accumu-

[redacted]

ı, en certains points, des matières solides que l'eau entraîne elle. La détermination du niveau d'équilibre peut faire con- immédiatement à laquelle de ces deux causes est dû l'affai- ment du débit du puits. Dans le premier cas, on trouvera que veau s'est abaissé; dans le second, au contraire, on trouvera n'a pas varié.

existe certains puits artésiens dont le débit varie avec la hau- de l'eau dans un cours d'eau voisin; une élévation du niveau ce cours d'eau est accompagnée d'une augmentation dans la tité d'eau que fournit le puits. De même le débit de certains artésiens, situés dans le voisinage de la mer, varie périodique- avec les marées; ce débit augmente ou diminue, suivant que rface des eaux, dans la mer voisine, monte ou descend. Il est le se rendre compte de ces phénomènes d'après ce que nous dit précédemment. Les affleurements inférieurs de la couche uelle aboutit le puits, ceux par lesquels sort l'eau qui se meut cette couche, peuvent être placés de différentes manières. Si ffleurements existent en des points de la surface du sol qui ne pas habituellement recouverts d'eau, ils donnent lieu à des es visibles; mais il n'en est plus de même s'ils sont situés sous d'une rivière ou de la mer. Dans ce dernier cas, l'orifice de du courant d'eau souterrain supporte une pression due à la ur du niveau de l'eau dans la rivière ou dans la mer au-dessus t orifice. Si cette hauteur vient à varier, la pression varie dans me sens, aux divers points du courant souterrain, de quantités ou moins grandes, suivant que ces points sont plus ou moins ochés de son orifice de sortie. Le niveau d'équilibre d'un puits ien alimenté par ce courant s'élèvera donc et s'abaissera, en temps que le niveau de l'eau qui presse sur les affleurements eurs de la couche, et par suite le débit du puits augmentera minuera en même temps.

308. Si le niveau d'équilibre d'un puits artésien se trouve au- ous de la surface du sol, l'eau ne peut pas monter jusqu'à l'ori- et par suite ce puits ne peut fournir de l'eau que comme les ordinaires, à la condition qu'on emploie des moyens particu- pour l'élever jusqu'à la surface du sol. Mais si, au lieu d'y r de l'eau, on y introduit, au contraire, ce qui tend à y faire er le niveau, l'équilibre sera rompu. La colonne d'eau contenue le puits deviendra trop haute pour être soutenue par la pres- qui s'exerce à sa partie inférieure; et en conséquence elle ndra, de *manière à rétablir* le niveau où il était précédem- *On pourra donc faire arriver* continuellement de l'eau dans

un pareil puits, sans qu'il s'emplisse ; cette eau s'écoulera dans la nappe souterraine à laquelle il communique : on aura ainsi ce que l'on nomme un *puits absorbant*.

On se sert très souvent de puits absorbants, tels que ceux dont nous venons de parler, pour se débarrasser d'eaux nuisibles, soit pour dessécher des terrains marécageux, soit pour faire disparaître l'humidité du sol dans le voisinage de constructions importantes auxquelles elle pourrait porter préjudice, soit enfin pour faire disparaître des eaux malsaines provenant d'un établissement industriel.

Il existe un exemple remarquable de puits absorbant à Saint-Denis, près Paris. En perçant un puits artésien sur la place de la Poste aux chevaux, on rencontra d'abord une couche absorbante ; puis plus bas une nappe d'eau jaillissante, et plus bas encore une seconde nappe jaillissante, dont l'eau était de meilleure qualité que celle de la précédente. On disposa dans ce puits trois tuyaux concentriques, s'élevant tous trois jusqu'à la surface du sol, mais descendant à des profondeurs différentes. Le tuyau intérieur, plus étroit que les deux autres, fut établi jusqu'à la seconde nappe jaillissante. Le second tuyau, enveloppant le premier, de manière à laisser un espace libre entre eux, descendit jusqu'à la première nappe jaillissante. Enfin le troisième tuyau, enveloppant le second de la même manière, ne descendit que jusqu'à la couche absorbante. Par cette disposition, les eaux de la nappe jaillissante inférieure montent par le tuyau central ; celles de la nappe jaillissante supérieure montent par l'espace annulaire compris entre le premier tuyau et le second ; et l'excédant de ces eaux, qui n'est pas employé pour l'usage de la ville, s'écoule dans la couche absorbante, par l'espace annulaire compris entre le second et le troisième tuyau.

§ 309. **Mouvement de l'eau dans les canaux.** — Lorsque l'eau contenue dans un canal y est animée d'un mouvement en vertu duquel elle le parcourt dans toute sa longueur, ce mouvement est régulier tant que les circonstances dans lesquelles il se produit restent les mêmes. Le canal étant supposé avoir partout la même forme et les mêmes dimensions, tant en largeur qu'en profondeur, et l'inclinaison de son fond ne variant pas d'un point à un autre, on trouvera que le mouvement du liquide est exactement le même dans les diverses sections transversales qu'on pourra imaginer dans toute son étendue. D'après cela il est clair que chaque molécule doit se mouvoir uniformément et en ligne droite, et que la surface libre du liquide doit être plane et inclinée dans le sens du courant, de manière à être parallèle au fond du canal.

mouvement de l'eau dans un canal peut être assimilé au
ment d'un liquide dans un tuyau dont les dimensions trans-
es sont uniformes dans toute sa longueur. La seule diffé-
consiste en ce que, dans le canal, l'eau présente une surface
tandis que, dans le tuyau, le liquide est entièrement enve-
par des parois solides. Les considérations développées précé-
ent (§§ 298 à 301) seront donc applicables au mouvement de
dans un canal, à la condition de tenir compte de la différence
ent d'être signalée.

bord les différents filets liquides ne sont pas animés d'une
e vitesse (§ 298) ; ils se meuvent d'autant plus vite qu'ils sont
éloignés des parois solides entre lesquelles l'eau coule. Celui de
les filets liquides qui est animé de la plus grande vitesse doit
se trouver sur la surface libre, au milieu de la largeur du ca-
et si, à partir de ce filet liquide, on se rapproche des bords ou
nd du canal, dans une direction quelconque, on trouvera des
ses de plus en plus petites. Ce n'est cependant pas exactement
que les choses se passent ; la plus grande vitesse des molé-
liquides ne s'observe pas sur la surface même de l'eau : mais
eu au-dessous. Cela tient à la présence de l'air atmosphérique
étant en contact avec la surface de l'eau, exerce aussi une
résistance à son mouvement, et empêche ainsi les filets
les qui sont à la surface de prendre la vitesse qu'ils prendraient
cela.

ur s'assurer de ce fait, que la vitesse de l'eau, au milieu de la
ur du canal, est moindre à la surface qu'à une petite distance
essous, on peut se servir de deux boules de cire liées l'une à
re par un fil d'une petite longueur. En mêlant à la cire de pe-
quantités d'autres substances, on peut faire en sorte que l'une
deux boules ait une densité moindre que celle de l'eau, et que
re au contraire ait une densité plus grande, de telle manière
ndant que l'ensemble de ces deux boules puisse flotter sur
, sans que la plus légère dépasse sensiblement la surface. Si ces
s sont mises dans une eau tranquille, elles se disposeront l'une
essous de l'autre, et le fil qui
éunit sera vertical. Mais si on
ette au milieu du courant qui
e dans un canal, elles sont en-
ées par l'eau, et le fil qui les
une à l'autre n'est plus verti-

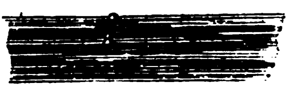


Fig. 382.

fig. 382 ; la boule inférieure se place en avant de la boule
rieure. Il est évident que cette position, que prennent

les boules dans le courant, ne peut être due qu'à ce que la vitesse de l'eau est un peu plus grande à une faible distance au-dessous de la surface qu'à la surface même.

Les molécules liquides qui traversent une même section transversale du canal étant animées de vitesses différentes, on appellera vitesse de l'eau, une vitesse moyenne entre celles de ces diverses molécules : ce sera la vitesse dont toutes les molécules devraient être animées à la fois, pour que la quantité d'eau qui traverse en une seconde la section que l'on considère reste la même (§ 299). D'après cette définition de la vitesse du courant, on voit que, quand on la connaîtra, il suffira de la multiplier par la surface de la section transversale du liquide, pour obtenir le volume de l'eau qui passe en une seconde par cette section transversale, c'est-à-dire ce que l'on nomme le *débit* du canal.

§ 310. L'uniformité du mouvement de chaque molécule liquide exige qu'il y ait équilibre entre les forces qui lui sont appliquées, et par conséquent aussi entre les forces auxquelles est soumise une tranche liquide comprise entre deux sections transversales très rapprochées. Or les forces appliquées à une pareille tranche sont de trois espèces (§ 300) : 1° le fond du canal étant incliné dans le sens du mouvement, le poids de la tranche que l'on considère donne une composante parallèle à ce fond, qui tend à accélérer son mouvement ; 2° les deux faces de la tranche supportent des pressions de la part du liquide voisin ; 3° la tranche liquide éprouve une résistance occasionnée par son frottement contre les parois solides qui la renferment, et aussi contre l'air avec lequel elle est en contact. Mais les pressions que la tranche éprouve sur ses deux faces sont évidemment égales entre elles ; car la surface de l'eau étant partout soumise à la pression atmosphérique, les pressions qui ont lieu aux divers points d'une section transversale du liquide doivent être les mêmes, en quelque endroit du canal que cette section ait été prise. Les pressions supportées par notre tranche liquide sur ses deux faces se détruisant mutuellement, il ne reste que les deux autres forces, qui, en conséquence, doivent se faire équilibre. La composante du poids de la tranche liquide dans le sens du mouvement doit donc être égale à la résistance produite par son frottement contre les bords et le fond du canal et contre l'air. On voit par là que l'inclinaison du fond du canal est indispensable pour que l'écoulement régulier puisse avoir lieu. De plus, la composante du poids d'une tranche liquide, dans le sens du mouvement, étant d'autant plus grande que l'inclinaison du fond est plus forte, on voit que la vitesse du courant augmentera avec cette inclinaison ;

[redacted]

en effet que la vitesse soit assez grande pour que le frot- contre les parois, frottement qui croît avec cette vitesse), devienne capable de faire équilibre à cette composante de la tranche.

4. **Mouvement de l'eau dans les rivières.** —Le mouve- de l'eau dans une rivière est analogue à celui dont nous de nous occuper; mais il ne présente pas la même régu- dans son ensemble, en raison de ce que le lit de la rivière partout la même largeur ni la même profondeur, et que n'a pas une pente uniforme. Cependant, si une partie ère d'une certaine étendue ne contient pas de trop grandes arités, on peut regarder le mouvement de l'eau comme y même que dans un canal, et tout ce qui a été dit dans le un canal pourra devenir applicable à cette partie de rivière. tirement la quantité d'eau qui coule dans une rivière nte depuis sa source jusqu'à son embouchure, soit à cause ents qui viennent s'y jeter, soit à cause des sources qui t dans son lit. Examinons ce qui a lieu dans une étendue t moins grande, dans laquelle nous admettrons que la quan- eau qui traverse une section transversale en une seconde partout la même. Si l'on suit la rivière, dans toute cette e, on observera souvent que la vitesse du courant varie up d'un point à un autre. Ce changement de vitesse est occa- par le changement des dimensions transversales de la ri- soit en largeur, soit en profondeur. Nous savons en effet que, multiplie la surface d'une section, faite dans la masse liquide, diculairement à la direction du courant, par la vitesse ne qui lui correspond, on obtient le volume de liquide qui e cette section en une seconde (§ 309); et puisque ce volume même pour toutes les sections faites dans la portion de rivière us nous occupons, il en résulte que, plus la surface d'une transversale de la masse d'eau sera petite, plus la vitesse l'y sera considérable. D'après cela, dans les endroits où la sera large et profonde, l'eau sera presque stagnante, tandis ans les lieux où son lit sera resserré et peu profond, l'eau imée d'une grande vitesse.

ons deux tranches liquides de même volume, et comprises e entre deux sections transversales du courant, faites à peu tance l'une de l'autre. Supposons que la première de ces es corresponde à un point de la rivière où le lit est large et d, et qu'en *conséquence* sa vitesse soit faible; et que la se- *tranche au contraire corresponde* à un point où le lit est

étroit et peu profond, ce qui exige que sa vitesse soit que celle de la première. La condition de l'égalité de ces deux tranches fait que la distance des sections tran terminent la seconde, et qui en forment comme les doit être plus grande que la distance correspondante mière tranche. D'après cela, on admettra sans difficul conde tranche frotte sur une plus grande étendue de p que la première. D'ailleurs cette seconde tranche a au grande vitesse que la première tranche, puisque sa se versale est plus petite. Donc, pour cette double rais tance produite par le frottement contre les bords et l est plus intense pour la seconde tranche liquide que mière (§ 304). Cette résistance devant être vaincue pour chaque tranche, par la composante de son poids lèlement à la direction du mouvement (§ 310), et les deux tranches étant les mêmes, il en résulte que le liquides doivent se mouvoir suivant des lignes plus in la seconde tranche que dans la première ; et qu'en l'inclinaison de la surface de l'eau doit y être également Ainsi, partout où le lit de la rivière est large et p l'eau n'est animée que d'une petite vitesse, la surface presque horizontale ; tandis que, dans les endroits où plus rapide, en raison du rétrécissement de la masse en profondeur qu'en largeur, la surface de l'eau pré clinaison beaucoup plus prononcée.

§ 312. Dans le moment des crues, la vitesse du une rivière, est bien plus grande que dans les circon naires. Pour s'en rendre compte, il suffit de voir com les deux forces qui doivent constamment se faire équil que tranche liquide, lorsque le niveau de l'eau vient à posons qu'habituellement la surface de l'eau soit en A

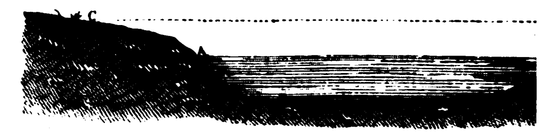


Fig. 383.

mais que, par suite d'une crue, elle s'élève jusqu'en nière que la surface de la section transversale de la devienne double de ce qu'elle était auparavant. V

[redacted]

atenue entre deux sections transversales voisines l'une de a double de ce qu'elle était précédemment ; mais l'éten- rois touchées par ce liquide n'aura pas augmenté dans le port. Si la vitesse du courant restait la même, il n'y au- quilibre entre la force qui tend à accélérer le mouvement ranche liquide et la résistance qui s'oppose à cette accé- car la première a été doublée par l'élévation du niveau, la seconde ne l'a pas été. Il faut donc que la vitesse du s'accroisse, pour que le frottement de l'eau contre les rienne capable de faire encore équilibre à la composante ids dirigée dans le sens du mouvement.

Mesure de la vitesse de l'eau. —Pour mesurer la vitesse de l'eau dans une rivière, à une profondeur quelconque



Fig. 384.

s de la surface, on peut employer avec avantage le mou- *Voltmann, fig. 384.* Ce moulinet consiste en une petite *e de plusieurs ailettes* planes, qui sont fixées aux extré-

mités d'autant de bras implantés sur un arbre
qui porte cette roue doit être placé dans la direc
vement de l'eau. Les filets liquides viennent re
de la roue, qui se présentent toutes obliquement
l'impulsion oblique que ces ailettes reçoivent
l'eau détermine un mouvement de rotation de la
tant plus rapide que la vitesse de l'eau est plus
d'après cela, que le nombre de tours effectué p
un temps donné puisse faire connaître la vites

L'appareil, que la *fig*. 384 représente de gra
disposé de manière à permettre de compter fac
l'arbre qui porte la roue. A cet effet, cet arbre
de vis G. Au-dessous de ce filet, se trouve une r
engrener avec lui, mais qui est habituellement al
que la communication ne soit pas établie entre
moulinet. A côté de cette première roue, s'en t
qui est mise en mouvement par un pignon fix
qui marche beaucoup plus lentement qu'elle. Le
roues B, B, sont portés par une pièce C mobile au
mité de gauche ; une tringle E sert à soulever l'
de cette espèce de levier, et à élever en même ter
de manière à faire engrener l'une d'elles avec
Lorsqu'on ne tire pas la tringle E de bas en ha
baisse sous l'action d'un ressort F, dont la parti
puie sur la monture de l'appareil ; alors les roue
en même temps, et deux petites saillies A, A, pé
dents pour les empêcher de tourner. L'apparei
glisser dans toute la hauteur d'une longue tige d
sert à le fixer en un point déterminé de cette tig

Pour installer le moulinet, on le fait monter su
ce qu'il se trouve à la hauteur à laquelle il do
dessus du fond de la rivière ; on le fixe dans ce
on introduit la tige D dans l'eau, en la plaçant
manière que son extrémité inférieure touche le
enfonce un peu, et que le moulinet soit placé en
vient le courant. Au bout de quelques instants, l
un mouvement uniforme de rotation, sous l'impuls
on tire la tringle E, et l'on met ainsi les roues B,
l'arbre du moulinet. On maintient cette commun
certain temps, pendant une minute, par exem
donne la tringle E ; les roues s'abaissent, cesser
avec l'arbre qui tourne, et s'arrêtent aussitôt

... saillies A, A, qui pénètrent entre leurs dents. On retire ...ent, et d'après la position que les saillies A, A, occupent ...ort aux roues B, B, on compte aisément le nombre total de ... la roue de droite a tourné pendant la durée de l'expé-...'est en même temps le nombre des tours effectués par le ... pendant ce temps: car, à chaque tour de son arbre, la ...vis G fait tourner cette roue d'une dent.

...mettra sans difficulté que le nombre des tours que fait le ... dans un temps donné est proportionnel à la vitesse de ... sorte qu'il suffira de connaître le nombre de tours qu'il ...que la vitesse de l'eau a une valeur déterminée, pour qu'on ... conclure tout de suite la vitesse du courant qui lui aura ... un autre nombre de tours pendant le même temps. Si, par ..., on sait que le moulinet fait 8 tours dans une seconde, ... la vitesse de l'eau est de 1^m par seconde, et que dans une ...ce on ait trouvé que le moulinet faisait 20 tours dans une ..., on en conclura que la vitesse de l'eau qui le mettait en ...ent était de $2^m,5$ par seconde.

...pidité avec laquelle le moulinet tourne sous l'action d'un ... dont la vitesse est de 1^m par seconde dépend de ses dimen-... de la disposition de ses ailettes. Pour connaître le nombre ...rs qu'il ferait dans une seconde s'il était plongé dans un pa-...urant, il faut faire une expérience préalable ; cette expérience ..., soit en plaçant l'appareil dans un courant dont on connaît ...se, soit en le transportant lui-même avec une vitesse donnée ...rieur d'une masse d'eau immobile.

...44. Le moulinet de Woltmann permet de déterminer la vitesse ... dans une rivière, à une profondeur quelconque au-dessous ...surface. Mais si l'on veut se contenter de mesurer la vitesse ...rface même, on peut employer un moyen plus simple. Il suf-... effet, de se servir d'un corps qu'on fera flotter sur l'eau, et ... pourra facilement observer le mouvement. On fera en sorte ... flotteur ne sorte presque pas de l'eau, afin qu'il ne soit pas ... à la résistance de l'air, et il prendra sensiblement la même ... que l'eau, surtout si sa masse est faible. On se sert avec ...age pour cela de pains à cacheter, qui remplissent très bien ...nditions précédentes.

... le courant présente de la régularité dans une certaine lon-..., le flotteur sera animé dans toute cette longueur d'un mou-...t uniforme, et il suffira de déterminer le nombre de secondes ...mploie à parcourir une distance connue, pour en conclure sa ... A cet effet on fixera d'avance, à l'aide de jalons, ou par

tout autre moyen, deux alignements dirigés perpendicul
à l'axe de la rivière, et l'on mesurera la distance entre ces
gnements; puis on observera le moment où le flotteur, qu
mis dans l'eau un peu plus haut, viendra passer dans la
de chacun d'eux. Si l'on n'avait pas de montre à second
mesurer le temps que le flotteur emploie à se rendre du
alignement au second, on pourrait se servir d'un pendule
des, ainsi que nous l'avons indiqué précédemment (§ 10

§ 315. On peut employer différents moyens pour avoir
d'un cours d'eau telle que nous l'avons définie (§ 309),
dire la vitesse que devrait avoir toute la masse liquide
se mouvait tout d'une pièce, pour que le débit du co
restât le même. Nous nous contenterons d'indiquer le plu
qui consiste à déduire la vitesse moyenne du cours d'e
vitesse observée à sa surface à l'aide d'un flotteur. On
servir pour cela du tableau suivant, qui donne la vitesse
correspondant à diverses valeurs de la vitesse à la surfa
bleau résulte d'expériences faites par Dubuat; et qu
expériences aient été faites en petit, on a reconnu que les
qu'il a trouvés peuvent être appliqués, sans grande erreur
termination de la vitesse moyenne d'un grand cours d'ea

VITESSE à la surface.	VITESSE moyenne.	VITESSE à la surface	VI mo
m 0,20	m 0,15	m 2,20	[illegible]
0,40	0,31	2,40	[illegible]
0,60	0,47	2,60	[illegible]
0,80	0,64	2,80	
1,00	0,81	3,00	
1,20	0,98	3,20	
1,40	1,16	3,40	
1,60	1,34	3,60	
1,80	1,52	3,80	
2,00	1,70	4,00	

La vitesse de la Seine, aux environs de Paris, est
0^{m},65. Les vitesses du Rhône et du Rhin sont d'env
s'élèvent même a 4^{m} dans les fortes crues.

§ 316. **Jaugeage d'un cours d'eau.**—Le moyen le

puisse employer pour jauger un cours d'eau, c'est-à-dire mesurer la quantité d'eau qu'il fournit en une seconde, consiste tiplier la surface de la section transversale de la masse liquide a vitesse moyenne qu'elle possède dans le voisinage de cette on (§ 309).

ous venons de voir comment on détermine la vitesse dont on a in. Quant à la détermination de la surface de la section trans-ale du cours d'eau, elle s'effectuera sans peine, à l'aide de son-s qu'on fera pour connaître la profondeur de l'eau en plusieurs ts situés dans une direction perpendiculaire au courant. Si l'on ve que la profondeur est la même dans toute la largeur d'un s d'eau, dont les bords sont escarpés, on en conclura que la ion transversale de l'eau est un rectangle; et l'on trouvera sa ace en multipliant la largeur de la rivière par la profondeur de . Si, au contraire, comme cela arrive généralement, on re-nait que la profondeur varie, suivant qu'on s'éloigne plus ou ns des bords, on fera des sondages régulièrement espacés dans e la largeur de la rivière : on les fera, par exemple, de mètre mètre. On regardera ensuite la portion de la section transver-comprise entre deux profondeurs consécutives qu'on aura me-ées, comme étant un trapèze qui aurait pour bases parallèles ces x profondeurs, et pour hauteur la distance horizontale des points es deux profondeurs ont été prises. En faisant la somme des faces des différents trapèzes ainsi obtenus, on aura la surface ière de la section.

Si l'on trouve, par exemple, que, dans un cours d'eau d'une geur de 8^m, la profondeur est partout de $1^m,6$, on en conclura la surface d'une section transversale est de 12,8 mètres carrés; i la vitesse moyenne de l'eau est de $1^m,5$, on trouvera que le it du cours d'eau est de 19,2 mètres cubes par seconde.

Un cours d'eau peut être classé parmi les rivières, lorsque, dans état ordinaire, il débite de 10 à 12 mètres cubes d'eau par onde. Lorsque le débit s'élève à 30 ou 40 mètres cubes, la ri-e est généralement navigable. Lorsque le débit surpasse 100 res cubes, le cours d'eau prend place parmi les fleuves. Ainsi, s les circonstances ordinaires, la Seine, à Paris, débite environ mètres cubes d'eau par seconde; la Garonne, à Toulouse, en te environ 150 mètres cubes; et le Rhône, à Lyon, plus de 600 mè-cubes. D'ailleurs la quantité d'eau que fournit un cours d'eau varie icoup d'une époque à une autre. Ainsi on a vu la quantité d'eau, nie par le Rhône, à Lyon, s'abaisser jusqu'à 200 mètres cubes, is que, le 12 février 1815, elle s'est élevée à 5770 mètres cubes.

§ 317. Lorsqu'un barrage a été établi en travers d'un co
d'eau, et que l'eau est obligée de s'élever contre ce barrage, p
couler par-dessus sa crête, on peut en profiter pour jauger le co
d'eau. Un pareil barrage prend le nom de *déversoir*. Il en e
quelquefois qui sont installés à demeure, et que l'on a const
par des raisons particulières, telles que le besoin d'élever le ni
de l'eau en amont. Mais on peut aussi construire des déver
provisoires, dans le seul but de déterminer plus exacteme
quantité d'eau que fournit le cours d'eau; ce moyen n'est évi
ment applicable qu'aux cours d'eau de peu d'importance.

L'observation de l'écoulement de l'eau par un déversoir
reconnaître que la surface de l'eau s'abaisse très sensiblement
d'atteindre le plan vertical qui passe par la crête du ba
fig. 385. L'épaisseur *ab* de la lame d'eau n'est guère que le
de la hauteur *ac* du
de l'eau au-dessus de l
Il résulte des expé
nombreuses de MM.
let et Lesbros que, po
ver la quantité d
passe par un déve
une seconde, on peu
de la manière suiva
évaluera la surface
tangle qui aurait p
la longueur du dév
pour hauteur la diff

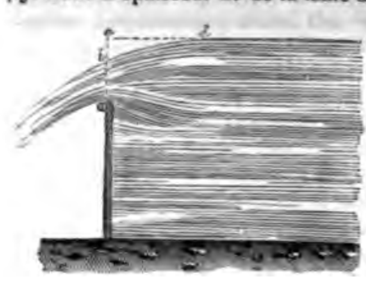


Fig. 385.

niveau *ac*; on multipliera cette surface par la vitesse
hauteur *ac* (§ 88); enfin on prendra les 0,405 du résu
obtenu.

§ 318. Il arrive très souvent que l'eau d'un cours d'
par l'ouverture d'une vanne; c'est ce qui a lieu, par exem
que cette eau est employée comme moteur, pour faire mo
roue hydraulique. La vanne consiste en une paroi rect
verticale ou oblique, qui est placée en travers d'un cours d
arrêter le liquide, et qui peut se lever plus ou moins, de
laisser au-dessous d'elle une ouverture rectangulaire pa
l'eau s'écoule. La veine liquide qui traverse un pareil orific
une forte contraction, dont l'intensité varie d'ailleurs ave
mensions de l'orifice, et aussi avec la hauteur du niveau
dans le bief supérieur au-dessus de cet orifice. MM. Po
Lesbros ont fait également des expériences nombreuses su

[redacted]

de ce genre ; il résulte de ce qu'ils ont trouvé que, dans les
ances ordinaires, lorsque la levée de la vanne est d'au moins
iètre, on obtiendra assez exactement la quantité d'eau qui
a une seconde, en opérant de la manière suivante. On dé-
ra la surface de l'ouverture par laquelle l'eau s'écoule, en
t cette surface dans un plan perpendiculaire à la direction
e des filets liquides ; on la multipliera par la vitesse due à
eur du niveau du liquide dans le bief au-dessus du centre de
d'écoulement ; enfin on prendra les 0,60 du résultat.

9. **Écoulement d'un gaz par un orifice.** — Lorsqu'un gaz
tenu dans une enveloppe fermée, et qu'on vient à pratiquer
ite ouverture dans cette enveloppe, le gaz tend à sortir en
le sa force élastique. Si l'espace qui existe à l'extérieur, dans
inage de cette ouverture, contient lui-même un gaz ayant la
force élastique, le gaz intérieur ne pourra pas sortir ; il
aintenu dans son enveloppe par la résistance du gaz exté-
et les choses se passeront de la même manière que si cette
ppe n'avait pas été percée d'un trou. C'est ce qui arrivera,
mple, pour une masse de gaz renfermée, sous la pression
hérique, dans une capacité qui est elle-même placée au milieu
mosphère. Mais si l'espace, dans lequel le gaz intérieur peut
dre en sortant par l'orifice qui lui est offert, se trouve vide
te matière, ou bien s'il contient un gaz ayant une force élas-
oindre que celle du gaz intérieur, il y aura écoulement du
érieur par l'orifice. Cet écoulement se produira avec une
d'autant plus grande que l'excès de la pression intérieure
pression extérieure sera plus considérable.

r trouver la vitesse d'écoulement d'un gaz par un orifice, que
upposerons percé en mince paroi, nous pouvons assimiler ce
un liquide. Concevons pour cela qu'un liquide ait la même
que le gaz qui s'écoule, cette densité étant prise à l'intérieur
apacité qui renferme ce gaz, au niveau de l'orifice d'écoule-
concevons de plus qu'un pareil liquide soit introduit dans
e ouvert par le haut, jusqu'à une hauteur telle que la pres-
i en résultera, au niveau de l'orifice par lequel il doit s'écouler,
gale à l'excès de la pression du gaz intérieur sur celle du gaz
eur. Ce liquide ayant la même densité que notre gaz, dans
inage de l'orifice d'écoulement, et y étant soumis à la même
on, devra s'écouler avec la même vitesse que le gaz. Mais la
que prend le liquide est celle qui est due à la hauteur de
face *libre dans le vase* au-dessus de l'orifice (§ 88), ce sera
galement avec cette vitesse que le gaz s'écoulera.

En appliquant ceci à un exemple, on verra bien de quelle manière la vitesse d'écoulement d'un gaz pourra être déterminée dans chaque cas. Supposons qu'une capacité fermée contienne de l'air dont la force élastique est mesurée par une colonne de mercure de $0^m,77$; que cet air se trouve à la température de 0°, et que la pression atmosphérique, à l'extérieur de la capacité qui le contient, soit de $0^m,76$. Si l'on pratique une petite ouverture en mince paroi dans l'enveloppe, l'air s'écoulera par cette ouverture en raison de l'excès de la pression intérieure sur la pression extérieure, excès qui est mesuré par une colonne de mercure de $0^m,01$. La densité de l'air, à la température de 0°, et sous la pression de $0^m,76$, est 770 fois plus petite que celle de l'eau, et par conséquent 10472 fois plus petite que celle du mercure. L'air que nous avons à considérer ici étant sous la pression de $0^m,77$, sa densité est un peu plus grande : d'après la loi de Mariotte (§ 249), cette densité est seulement 10336 fois plus petite que celle du mercure. Pour qu'un liquide de même densité, placé dans un vase ouvert par le haut, exerce au niveau de l'orifice par lequel il s'écoule, une pression mesurée par $0^m,01$ de mercure, il faut que sa surface libre soit située à $103^m,36$ au-dessus de l'orifice. Sa vitesse d'écoulement sera donc de 45^m par seconde ; c'est en même temps la vitesse d'écoulement de l'air que nous considérons.

On voit par cet exemple qu'un excès de pression très faible détermine une vitesse d'écoulement considérable. Cela tient à la petitesse de la masse de gaz qui est mise en mouvement par cet excès de pression (§ 94). On voit également que, pour un même excès de pression de l'intérieur à l'extérieur, la vitesse d'écoulement doit varier avec la nature du gaz, et aussi avec sa température ; puisque cette vitesse dépend de la densité que possède le gaz avant de sortir de la capacité qui le renferme.

§ 320. La quantité de gaz qui passe par l'orifice dans un temps donné peut s'évaluer comme on l'a fait pour un liquide (§ 287). Si l'on admet que les molécules gazeuses traversent l'orifice en se mouvant perpendiculairement à sa surface, on trouvera le volume du gaz écoulé en une seconde en multipliant la surface de l'orifice par la vitesse d'écoulement. Le volume ainsi obtenu est celui qu'occuperait le gaz après sa sortie de l'orifice, s'il conservait la même densité qu'il avait à l'intérieur du réservoir ; et comme le gaz se dilate en sortant, en raison de la diminution de pression qu'il supporte, il en résulte qu'on devra augmenter le volume trouvé, dans le rapport dans lequel la force élastique du gaz a diminué, afin d'obtenir le volume qu'il occupe réellement après sa sortie.

En déterminant par l'expérience la quantité de gaz qui s'écoule en une seconde par un orifice percé en mince paroi, on trouve que cette quantité est beaucoup plus petite que celle qui résulte des considérations précédentes : la *dépense effective* n'est que les 0,65 de la *dépense théorique*. La différence que l'on trouve ainsi, entre le résultat indiqué par la théorie et celui que fournit l'expérience, est encore due ici à ce que nous avons commis une erreur en admettant que les molécules gazeuses traversent l'orifice perpendiculairement à sa surface. La veine gazeuse se contracte au delà de l'orifice, de même qu'une veine liquide. C'est ce qu'on peut vérifier très facilement en chargeant l'air de fumée, ce qui rend la veine gazeuse visible, et permet d'en observer la configuration. La contraction de la veine gazeuse est un peu moins forte que celle qu'éprouve la veine liquide dans les mêmes conditions ; puisque la dépense effective est les 0,65 de la dépense théorique, dans le cas d'un gaz, et qu'elle n'en est que les 0,62, dans le cas d'un liquide.

En adaptant un ajutage à l'orifice d'écoulement d'un gaz, on modifie considérablement les conditions de l'écoulement, et ces modifications s'expliquent exactement de la même manière que dans le cas d'un liquide. Avec un ajutage cylindrique, on obtient une dépense effective qui est les 0,93 de la dépense théorique. Quand on emploie un ajutage légèrement conique et convergent, la dépense effective devient les 0,94 de la dépense théorique évaluée à l'aide de l'orifice de sortie de l'ajutage.

§ 321. **Mouvement des gaz dans des tuyaux.** — Lorsqu'un gaz se meut à l'intérieur d'un tuyau, il éprouve de la part des parois une résistance analogue à celle dont nous avons parlé pour les liquides (§ 298). Cette résistance est proportionnelle à l'étendue de la surface contre laquelle le gaz glisse. Elle varie aussi avec la vitesse du gaz : mais contrairement à ce qui a lieu dans le cas d'un liquide (§ 301), on peut la regarder comme étant proportionnelle au carré de la vitesse du gaz. Cette loi, qui lie la résistance des parois du tuyau à la vitesse du gaz, a été reconnue exacte pour toutes les vitesses que l'air prend habituellement dans les tuyaux de conduite, vitesses qui sont comprises entre 3^m et 50^m par seconde.

La présence des coudes et des étranglements, dans les tuyaux que parcourt un gaz, occasionne une grande résistance à son mouvement. C'est pour produire une pareille résistance, et par suite modérer la vitesse du gaz, qu'on place dans les tuyaux de poêle une clef, ou soupape à gorge, telle que celle qui est représentée par la *fig. 380 (page 441)*.

[redacted]

§ 322. Le gaz qui sert à l'éclairage dans les villes est intr d'abord à l'intérieur de grands réservoirs, auxquels on donne le de *gazomètres*, et de là il se rend aux différents becs où il brûler, en passant par des tuyaux qui sont établis sous le pav rues. Un gazomètre n'est autre chose qu'une cloche de tôle, *fig.* qui est plongée dans une grande fosse contenant de l'eau. I

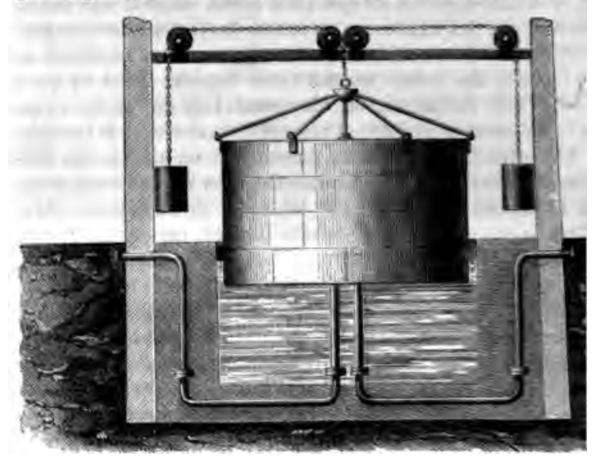


Fig. 386.

est amené sous cette cloche, à mesure de sa fabrication, tuyau qui arrive au fond de la fosse, et qui se relève vertic pour se terminer au-dessus du niveau que peut atteindre l gaz ne peut s'échapper au dehors ; il est maintenu latér et à sa partie supérieure par la paroi cylindrique et le fon cloche, et à sa partie inférieure par l'eau de la fosse avec il est en contact. Le poids de la cloche est en grande partie é par des chaînes fixées à sa partie supérieure, qui passent poulies de renvoi, et se terminent à des contre-poids. La restante du poids de la cloche, augmentée du poids du ga contient, est mise en équilibre par la poussée que la cloche de bas en haut. Cette poussée est due à la fois à l'action dans lequel la partie supérieure de la cloche est plongée, et de l'eau de la fosse, dont le niveau est plus bas à l'intérieu cloche qu'à l'extérieur.

Les contre-poids, qui équilibrent une partie du poids de la

léterminés de manière que la différence de niveau de l'eau a fosse, à l'intérieur et à l'extérieur de la cloche, ne soit que lques centimètres. En vertu de cette différence de niveau, le ateau dans la cloche est un peu plus pressé que l'air atmose environnant, et c'est ce qui l'oblige à sortir par un second placé à l'intérieur comme le premier par lequel il avait été . De là le gaz se répartit entre les divers tuyaux qui ont été és pour le conduire aux orifices par lesquels il doit s'écouler air en brûlant. L'excès de la pression du gaz dans le gazosur celle de l'air atmosphérique, tout en étant très faible, ait lieu à une grande vitesse d'écoulement par chaque orifice, uyaux n'exerçaient pas une grande résistance au mouvement gaz ; cet excès de pression est en réalité presque entièrement é à vaincre cette résistance, et la vitesse d'écoulement ue qu'à la très faible portion de cette puissance qui reste ponible, après que les frottements contre les tuyaux ont . Pour modérer la vitesse avec laquelle le gaz sort par tourne, d'une quantité plus ou moins grande, le robinet té au tuyau près de ce bec ; on produit par là un étrandiminue la vitesse, en augmentant les résistances qui au mouvement du gaz.

. **Mesure de la vitesse d'un courant d'air.** — Nous diqué sommairement (§ 264) les principales causes qui dént les mouvements de l'air atmosphérique, ou ce que l'on les vents. Nous avons vu ensuite (§§ 265 et 266) comment les nces de températures produisent des courants d'air à l'intérieur nes et dans les cheminées. Dans d'autres circonstances, l'air s en mouvement par des machines spéciales, dont nous nous rons plus tard. De quelque manière que se produise un cou'air, il est souvent utile de mesurer sa vitesse. On y parvient yen de l'*anémomètre* de M. Combes. C'est un instrument anau moulinet de Woltmann représenté par la *fig.* 384 (page 453), st construit avec une très grande légèreté, et approprié à e spécial auquel il est destiné. L'emploi de cet instrument est ours entièrement pareil à celui du moulinet.

tableau suivant indique la vitesse que possèdent les molécules dans les diverses espèces de vents.

DÉSIGNATION DES VENTS.
Vent seulement sensible . . . .
Vent faible. . . . .
Vent *frais* ou *brise* (tend bien les voiles) . . . .
Vent le plus convenable aux moulins. . . . .
Bon frais, très bon pour la marche en mer. . . . . . .
Grand frais, fait serrer les hautes voiles. . . . .
Vent très fort. . . . .
Vent impétueux . . . .
Grande tempête . . . .
Ouragan. . . . .
Ouragan qui renverse les édifices . . . .

§ 324. Pression exercée par une veine liquid surface. — Lorsqu'une veine liquide vient rencontrer une *fig*. 387, qui s' continuation de ment, elle s'éta surface, et en m lui fait supporte sion. Admetto qu'il s'agisse d'u plane disposée p lairement à la d liquide. Les dim la surface ont un sur la grandeur

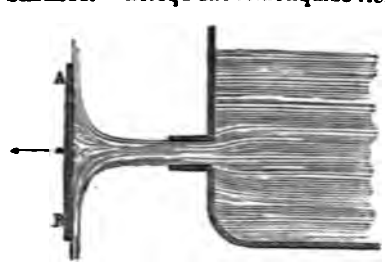


Fig. 387.

sion qu'elle supporte. On conçoit en effet que cette press nant de la réaction des filets liquides qui sont obligés de direction, sera d'autant plus forte que le mouvement de ce été plus grandement modifié. Or, si la surface rencontrée p n'est pas plus large que la veine, les filets liquides se dé bien pour passer tout autour d'elle : mais leur direction changée autant que si la surface était plus grande. A la surface sera plus étendue, la direction des filets liqui échapperaient sur tout son contour s'approchera davan parallèle à la surface même ; et c'est lorsque ce parall complétement obtenu qu'on atteindra la pression maxim veine puisse exercer sur cette surface. L'expérience a naître que, pour arriver à ce résultat, il faut que la su

[redacted]

5 à 8 fois plus grande que la section transversale de la

rant la pression exercée sur la surface, ce qui peut se e d'un ressort contre lequel cette surface s'appuierait, qu'elle pouvait être représentée par le poids d'un cy- quide ayant pour base la section de la veine, et pour double de la hauteur de chute qui donnerait lieu à la possède cette veine. Si l'on observe de plus que la hau- ute qui produit une certaine vitesse est proportionnelle cette vitesse (§ 87), on pourra dire que la pression une veine liquide sur une surface plane, perpendiculaire ion et suffisamment large, est : 1° proportionnelle à la la veine ; 2° proportionnelle au carré de la vitesse des liquides qui la composent.

se rendre compte de ce résultat d'une manière très bord, à égalité de vitesse de la veine liquide, il est bien a pression supportée par la surface doit être proportion- ombre des molécules qui viennent la rencontrer dans un né, et par conséquent proportionnelle à la section de la second lieu, si deux veines de même section transversale les de vitesses différentes, dont l'une sera par exemple l'autre, la pression exercée par la première sera quatre rande que celle exercée par la seconde ; car, d'une part, lécule ayant une vitesse double, produit individuelle- action deux fois plus grande ; et, d'une autre part, il la surface deux fois plus de molécules dans le même

Si la surface contre laquelle vient tomber la veine liquide plane, la pression qu'elle a à supporter dépend de sa te pression sera plus ou moins grande suivant que la sur- ra les filets liquides à changer plus ou moins de direc- surface est convexe, les filets liquides seront moins for- ournés qu'ils ne le seraient par une surface plane ; aussi exercée sera-t-elle moins forte que celle qui correspond ace plane. Si, au contraire, la surface rencontrée par la de est concave, la pression sera plus grande que dans le surface plane.

exemple, la veine vient frapper au centre d'un hémi- ux, *fig*. 388, les filets liquides s'échapperont, tout autour de cet hémisphère, avec des vitesses égales et contraires 'ils *avaient avant* d'atteindre la surface. Chacun de ces *gera d'abord de direction* jusqu'à devenir perpendiculaire

à sa direction primitive, comme s'il avait rencontré une
plane. Mais ce changement de direction ne s'arrêtera

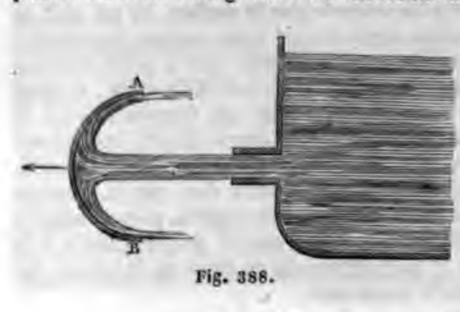


Fig. 388.

Fig. 389.

il continu
produire ju
que le filet
parallèle à
la veine, en
vant en se
traire; et, d
seconde p
réagira sur
face auta
dans la p
La pressi
supportée
hémisphèr
devra donc
ble de cell
rait suppo
surface p
cevant per
lairement
de la mêm
L'expérien
firme ce r
la théorie

§ 326. Lorsqu'une veine liquide vient frapper une surf
AB, *fig*. 389, qui se présente obliquement à sa direction
sion qu'elle exerce sur cette surface n'est plus la même
l'avait rencontrée perpendiculairement. La vitesse CD d
liquide peut être regardée comme résultant de la comp
deux vitesses CE, CF (§ 103), dont l'une soit perpendi
plan AB, et l'autre lui soit parallèle. En vertu de la vite
veine liquide ne fait que se mouvoir parallèlement au pl
qui ne peut donner lieu à aucune pression sur ce plan. L
supportée par le plan est donc due uniquement à la v
elle est la même que si la veine se mouvait perpendicul
AB, avec la vitesse CE, et que sa section transversale
la section faite dans notre veine liquide par un plan para

§ 327. Si la surface plane que vient rencontrer une ve
est elle-même en mouvement, on arrivera de la maniè
à déterminer la pression qu'elle aura à supporter de

[redacted]

On observera que le mouvement relatif de la veine liquide port à la surface, qui seul occasionne la pression que cette supporte, ne sera nullement modifié si l'on donne un mou- commun à l'ensemble de la veine liquide et de la surface; servoir d'où sort la veine liquide et la surface sur laquelle be se trouvent placés sur un bateau, la pression exercée veine sera la même, soit que le bateau soit en repos, soit arche dans une direction ou dans une autre. On pourra donc r que l'on donne à la veine liquide ou au plan mobile qu'elle contrer une vitesse commune égale et contraire à la vitesse n. La pression du liquide sur le plan ne sera nullement e par là. Mais le plan, se trouvant animé de deux vitesses et contraires, sera réduit à l'immobilité; et le liquide, animé de la vitesse qu'il avait et de celle qu'on vient de lui attri- possédera une vitesse unique résultant de la composition de ux vitesses (§ 103). On aura donc ainsi ramené la détermi- de la pression exercée par une veine liquide sur une surface qui est en mouvement, à celle de la pression qui se produit le cas où cette surface est en repos.

posons, par exemple, que la surface plane qui reçoit l'action veine liquide soit animée d'une vitesse dirigée suivant l'axe de la veine, et dans le sens du mouvement du liquide; ou, utres termes, que cette surface fuie, pour ainsi dire, devant ide. La vitesse des molécules liquides devra être plus grande lle du plan; sans quoi il n'y aurait pas de pression produite. pliquant ce qui vient d'être dit en général, on trouvera que sion supportée par le plan est la même que si ce plan était ile, et que la veine liquide ne fût animée que de la différence a vitesse propre et celle du plan.

e plan se mouvait toujours dans la direction de l'axe de la liquide, mais en sens ire du mouvement de veine, la pression qu'il rterait serait la même 'il était immobile, et veine liquide possédât tesse égale à la somme vitesse propre et de lu plan.

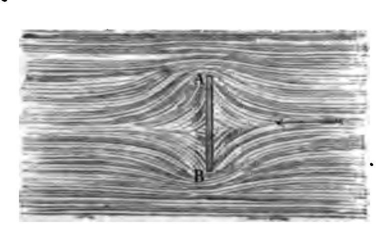


Fig. 390.

3. Pression suppor- ur un corps plongé s un liquide en mouvement. — Lorsqu'un plan AB,



la présence du plan.

Un corps de forme quelconque, plongé dans un
et maintenu immobile dans ce courant, éprouv
pression due aux deux causes dont il vient d'êtr
cette pression totale varie beaucoup suivant la for
la partie antérieure du corps, celle qui est directe
l'action des filets liquides, et aussi la partie post
voisinage de laquelle se produisent les remous dont

L'expérience indique que, pour un même corps,
il s'agit est proportionnelle au carré de la vitesse d
pour une même vitesse du liquide et des corps de
bles, cette pression est proportionnelle à l'étendue
section transversale du corps. Si un corps n'est plo
dans la masse liquide, si c'est par exemple un corp
devra considérer évidemment que la partie de ce co
au-dessous de la surface du liquide.

Pour une même vitesse du liquide et une mêm
plus grande section transversale du corps plongé,
exercée par le liquide est d'autant plus faible que
rieure et postérieure du corps présentent des surfac
à la direction des filets liquides : cette pression t
augmentée par les parties anguleuses de ces surf
quelles les filets liquides sont obligés de se mouve

Si, par exemple, le corps se meut dans la même direction que le [illegible]de, soit dans le même sens, soit en sens contraire, la pression [illegible] supportera sera la même que s'il était en repos, et que le li[illegible] fût animé d'une vitesse égale à la différence ou à la somme [illegible] vitesse propre et de la vitesse du corps.

[illegible]rsqu'un corps se meut dans un liquide en repos, il éprouve [illegible]ême pression que s'il était immobile au milieu du liquide, et [illegible] celui-ci fût animé d'un mouvement égal et contraire à celui [illegible] possède le corps. C'est cette pression, éprouvée par un corps [illegible] se déplace dans un liquide, qui constitue la résistance dont [illegible] avons parlé précédemment (§ 129), et dont nous avons indi[illegible] sommairement les lois.

La force qui doit être appliquée à un navire, pour entretenir son [illegible]vement, n'a à vaincre que la résistance opposée par l'eau dans [illegible]elle il se meut, ainsi que celle qui est occasionnée par l'air, [illegible] qui est beaucoup plus faible. Pour diminuer la grandeur de la [illegible]ce motrice correspondante à une vitesse donnée, ou bien encore [illegible] augmenter la vitesse qu'une même force motrice peut produire [illegible] entretenir, on a soin de donner aux navires une forme telle, qu'à [illegible]lité de volume immergé, la résistance au mouvement soit aussi [illegible]ite que possible. Cette condition doit se combiner avec celle qui [illegible] déjà été énoncée (§ 276) et qui a pour objet la stabilité de l'équi[illegible]bre. C'est pour atteindre ce but qu'on donne à la proue une forme [illegible]i lui permet de fendre facilement les flots, et qu'on arrondit les [illegible]ancs du navire, tant vers la poupe que vers la proue, afin d'éviter l'augmentation de résistance qui résulterait de la présence de par[illegible]ties anguleuses.

Pour faire comprendre combien la forme d'un navire a d'in[illegible]fluence sur la résistance que le liquide oppose à son mouvement, il suffit de citer le résultat d'une expérience faite par Bossut. Un modèle de vaisseau de ligne, et un prisme de même longueur qui avait pour base la plus grande section transversale du vaisseau, furent mis en mouvement dans le sens de leur longueur, dans une eau tranquille, et avec le même tirant d'eau ; Bossut trouva que l'eau opposait au prisme une résistance 5 fois plus grande qu'au vaisseau.

§ 330. **Pression exercée sur un corps par un gaz en mouvement.** — Une veine gazeuse, qui vient rencontrer une surface fixe ou mobile, exerce sur elle une pression analogue à celle qui est produite dans les mêmes circonstances par une veine liquide. Cette pression est soumise aux mêmes lois (§§ 324 à 327) ; et il n'y a *de différence essentielle* que dans son intensité, qui est gé-

néralement beaucoup plus faible que quand il s'agit d'un liquide, en raison du peu de masse de la quantité de gaz qui vient rencontrer la surface dans un temps déterminé.

Un corps qui est plongé au milieu d'une masse gazeuse en mouvement éprouve également une pression analogue à celle qu'il éprouverait si le gaz était remplacé par un liquide aussi en mouvement. Cette pression, qui devient une résistance au mouvement, dans le cas où le corps se meut à l'intérieur d'un gaz en repos, est soumise aux mêmes lois (§§ 328 et 329) que si elle était produite par un liquide.

§ 331. **Résistance de l'air à la chute des corps.** — Nous avons vu (§ 82) que si les corps ne tombent pas tous avec la même vitesse, cela tient à la résistance que l'air atmosphérique oppose à leur mouvement. Il nous est facile maintenant de nous rendre compte de la manière dont cette résistance agit sur les différents corps.

Lorsqu'un corps tombe dans l'air, il est soumis à l'action de deux forces, dont l'une est son poids, et l'autre est la résistance de l'air. Pour des corps de même poids et de surfaces différentes, la première force est la même, et la seconde est d'autant plus grande que la surface qui vient directement choquer l'air est plus étendue: donc ces corps tomberont d'autant moins vite qu'ils présenteront à l'air une plus grande surface. Un même corps tombera plus ou moins rapidement, suivant qu'on le tournera de telle ou telle manière : c'est ainsi que la rapidité de la chute d'une feuille de papier sera très différente, suivant qu'on placera ses deux faces horizontalement ou verticalement.

Des corps de même nature et de formes semblables ne tombent pas avec la même rapidité, si leurs grosseurs sont différentes. S'il s'agit de deux balles de plomb, dont l'une ait un diamètre double de celui de l'autre, on voit que le poids de la plus grosse des deux est 8 fois plus grand que le poids de la plus petite; leurs masses sont aussi dans le même rapport; il faudrait donc que la résistance de l'air fût 8 fois plus grande sur la première balle que sur la seconde pour que leur mouvement fût le même. Mais il n'en est rien. A égalité de vitesse, la résistance que l'air opposera au mouvement de la première balle ne sera que 4 fois plus grande que celle qu'éprouvera la seconde, puisque les surfaces de leurs plus grandes sections transversales sont entre elles dans le rapport de 4 à 1 : donc la plus grosse des deux balles tombera plus vite que l'autre. Ces mêmes considérations font voir pourquoi, en lançant des projectiles de même nature, mais de diverses grosseurs, au moyen d'une arme à feu, on atteint à une distance d'autant

grande que les projectiles sont plus gros ; la résistance de l'air mouvement du projectile se fait d'autant moins sentir, que le port de sa masse à sa surface est plus considérable.

orsqu'un corps tombe dans l'air, son mouvement s'accélère, s pas autant que s'il tombait dans le vide, en raison de la résistance qu'il éprouve de la part de l'air. A mesure que sa vitesse mente, la résistance de l'air augmente aussi ; son mouvement célère donc de moins en moins, puisque l'excès de son poids la résistance diminue constamment. On peut même reconnaître la vitesse du corps ne peut pas dépasser une certaine limite : vitesse limite est celle pour laquelle la résistance de l'air it égale au poids du corps. On voit en effet que, si le corps ait à avoir cette vitesse, la force qui tend à accélérer son mouvement serait mise en équilibre par celle qui tend à le retarder, t en conséquence le mouvement resterait uniforme. La vitesse e dont nous parlons sera d'ailleurs d'autant plus petite que, une même masse, le corps présentera une plus grande surà l'air. C'est par ces considérations qu'on peut se rendre



g. 391. Fig. 392.

te de la manière dont fonctionnent les *parachutes*, à l'aide uels on peut se laisser tomber d'une grande hauteur, sans qu'il

en résulte le moindre accident. Le parachute est un appareil q exactement la forme d'un grand parapluie, et qui supporte à partie inférieure un panier dans lequel on peut se placer. Lors le parachute est fermé, *fig.* 391, il peut tomber avec une grande tesse; mais lorsqu'il est ouvert, *fig.* 392, il présente une très gra surface à l'air, et, malgré le poids qu'il supporte, il ne peut pre qu'une vitesse très modérée. Si le parachute, avant de s'ouvri pris une vitesse un peu grande, cette vitesse diminue aussitôt vient de s'ouvrir, en raison de la résistance de l'air qui, l'empor sur le poids total de l'appareil, ralentit son mouvement.

§ 332. **Action du gouvernail dans le mouvement d navire.** — Le gouvernail, que l'on adapte à la poupe d'un na a pour objet de donner au mouvement de ce navire telle direc qu'on veut. Ce n'est autre chose qu'une surface plane, disp verticalement, et mobile autour d'un de ses côtés verticaux, qu fonction de charnière. Pour faire tourner le gouvernail autou cette espèce de charnière, on agit sur un long levier qui est horizontalement à sa partie supérieure, ou bien sur une roue v cale, munie de poignées sur tout son contour, qui est placée le pont du navire, et dont le mouvement de rotation se commun au gouvernail.

Admettons que le liquide sur lequel se meut le navire so repos, que la force qui est appliquée à ce navire tende à le mouvoir dans le sens de sa longueur, et que son mouvement s'effectuer dans ce sens pendant un certain temps, sans chang direction. On devra placer le gouvernail de manière que ses faces soient dans la direction même de l'axe du navire, et par séquent du mouvement dont il est animé. Mais, si l'on veut q moment donné le navire prenne une autre route, que sa pro dirige, par exemple, à droite du point vers lequel elle était d jusque-là, on fera tourner le gouvernail de ce même côté, *fig*

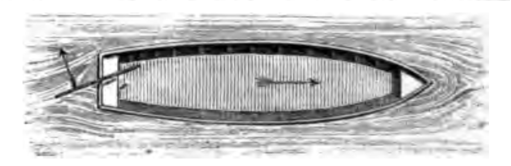


Fig. 393.

Le mouvement du navire se continuant comme il avait lieu l'instant d'auparavant, le gouvernail éprouvera de la part d

une pression perpendiculaire à sa surface, pression qu'il n'éprouvait pas avant qu'on lui eût donné sa nouvelle position. Cette pression agit sur le navire avec lequel le gouvernail fait corps, et l'oblige à tourner dans le sens voulu. Lorsque l'axe du navire a été ainsi amené dans la nouvelle direction qu'il doit prendre, on replace le gouvernail comme il était précédemment, et le mouvement s'effectue en ligne droite, jusqu'à ce qu'on agisse de nouveau sur le gouvernail.

Le mouvement d'un navire a souvent lieu dans des conditions moins simples que celles que nous venons de supposer. La force qui le fait mouvoir n'agit pas toujours dans le sens du mouvement qu'on veut lui donner; c'est ce qui a lieu la plupart du temps, par exemple, lorsque le navire est poussé par le vent. De même le liquide dans lequel s'effectue le mouvement est souvent animé lui-même d'une certaine vitesse, dont la direction est différente de celle que doit prendre le navire; il en résulte que la résistance, que le liquide oppose au mouvement du navire n'agit pas suivant son axe. Si le navire, dans de telles conditions, n'avait pas de gouvernail, il se déplacerait en ne suivant généralement pas le chemin qu'on veut lui faire suivre. A l'aide du gouvernail, en le faisant tourner, soit d'un côté, soit de l'autre, on développe une nouvelle force provenant de la pression qu'il supporte de la part du liquide; et l'on fait en sorte que cette nouvelle force, en se combinant avec celles dont nous venons de parler, donne au navire le mouvement qu'on veut lui faire prendre.

Le gouvernail d'un navire n'est qu'une imitation de la queue des poissons, qui leur sert à se diriger à volonté d'un côté ou d'un autre; il leur suffit pour cela de la dévier de sa position naturelle, en la portant un peu à droite ou à gauche.

§ 333. **Propulsion des navires à l'aide de rames, de roues, ou d'hélices.** — Les rames, dont on se sert pour produire et entretenir le mouvement d'un bateau, sont des leviers droits ayant leur point d'appui sur les bords du bateau. L'une des extrémités de chaque rame plonge dans l'eau, tandis qu'un homme assis dans le bateau, le dos tourné à la proue, tire l'autre extrémité vers lui. En agissant ainsi sur la rame, il la fait tourner autour de son point d'appui, et par suite l'extrémité qui plonge dans l'eau s'y met en mouvement, en allant de la proue à la poupe. Ce mouvement de la rame développe une résistance de la part du liquide : cette résistance est une force qui lui est appliquée, et qui est dirigée en sens contraire de son mouvement, c'est-à-dire de la poupe à la proue. La rame se trouve ainsi soumise à l'action de deux forces parallèles et



pieds contre le bateau, de manière à lui appliqu
égale et contraire à cette force de traction ; la force
la contraction de ses muscles fait que son corps fo
un ressort qui aurait été comprimé, et qui, en che
tendre, exercerait des pressions égales et contrair
avec lesquels il serait en contact par ses extrémit
l'homme sur la rame détermine bien, au point où elle
le bateau, une pression égale à la résultante dont r
il n'y a qu'un instant ; mais elle donne lieu en mê
pression en sens contraire, exercée par ses pieds. I
bateau n'est soumis qu'à la différence de ces de
rence qui est précisément égale à la pression que l
de la part du liquide dans lequel elle se meut : c
seule qui tend à accélérer le mouvement du bateau

Ce résultat auquel nous venons d'arriver s'obtie
médiatement, si l'on ne s'inquiète pas de savoir c
est liée au bateau, ni par quel moyen elle est mise
La résistance que l'eau lui oppose est évidemmen
extérieure qui agisse sur le bateau, et qui puis
comme étant la force motrice tendant à augmenter

Lorsqu'une rame a tourné d'une certaine quanti
point d'appui, elle ne se trouve plus dans une posi
pour continuer son action. Alors l'homme qui la m

[redacted]

elle est plongée dans l'eau ; dans le second, elle est
, se meut dans l'air.
ue la rame éprouve de la part de l'eau est d'au-
e qu'elle rencontre le liquide sous une plus grande
une plus grande vitesse. C'est afin de ne pas avoir
vitesse trop considérable, pour produire une action
le bateau, qu'on élargit la partie qui doit plonger
e lui conservant que l'épaisseur nécessaire à sa so-
it, par cet accroissement de surface, le même effet
e produit par une augmentation de la vitesse ; mais
la rame en est rendue plus facile.
bateau marche convenablement, à l'aide de rames,
ait un nombre pair qui agissent, moitié d'un côté,
e. Sans cela, les impulsions que le liquide transmet
l'intermédiaire des diverses rames, donneraient lieu
qui serait trop éloignée d'être dirigée suivant son
rait constamment à se détourner de sa route, par
oblique de cette résultante.
faire marcher un bateau de grande dimension au
s, il faudrait en employer un grand nombre, ce qui
inconvénients de plus d'un genre, surtout pour des
longs. Dans ce cas, on remplace les rames par des
, *fig.* 394, auxquelles on donne un mouvement de

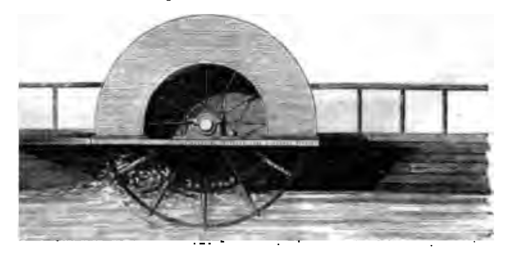


Fig. 394.

yen d'une machine à vapeur : c'est ce qui constitue
vapeur. Les roues sont au nombre de deux, une de
bateau ; elles sont montées aux deux extrémités
zontal, qui traverse le bateau perpendiculairement
et qui reçoit un mouvement de rotation de la ma-
. Les palettes de ces roues fonctionnent absolument
nes. Lorsqu'elles sont à la partie inférieure de la

circonférence qu'elles décrivent, elles plongent dans l'eau, et marchent de la proue vers la poupe ; elles sortent ensuite de l'eau, se meuvent dans l'air en sens contraire, pour revenir plonger dans l'eau, et s'y mouvoir de la même manière que précédemment. C'est la pression que l'eau exerce sur les palettes immergées qui constitue la force motrice appliquée au bateau, et tendant à accroître sa vitesse.

§ 335. Depuis quelques années, on s'est beaucoup occupé de remplacer les roues des bateaux à vapeur par des hélices. Pour nous rendre compte du mode d'action de ces hélices, auxquelles on a donné des formes très diverses, imaginons qu'un bateau soit muni d'une vis, dont l'axe, placé horizontalement, soit dirigé dans le sens de la longueur du bateau ; concevons de plus que cette vis, pouvant tourner autour de son axe, dans des collets fixés au bateau, soit engagé dans un écrou solidement maintenu dans une position invariable par rapport au sol environnant. Si l'on fait tourner la vis, elle marchera dans l'écrou, et entraînera le bateau avec elle. L'hélice qu'on adapte à un bateau est une véritable vis, qui fonctionne d'une manière analogue à celle dont nous venons de parler ; et il n'y a de différence qu'en ce que l'écrou fixe est remplacé par l'eau dans laquelle l'hélice tourne. Cette eau, qui fait fonction d'écrou, ne reste pas immobile comme l'écrou qu'elle remplace ; mais la résistance qu'elle exerce sur les surfaces inclinées de l'hélice ne communique pas moins au bateau un mouvement de progression, qui est d'autant plus rapide que l'hélice tourne plus vite.

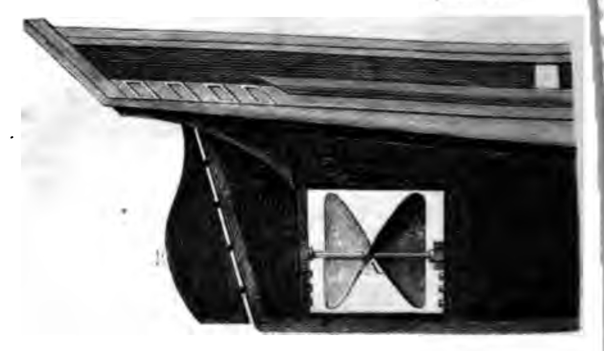


Fig. 395.

L'hélice A, fig. 395, se place à l'arrière du bateau, vers sa partie

eure, et dans le plan vertical qui passe par son axe; elle se
re ainsi à une petite distance en avant du gouvernail B.
i l'on fait attention à la manière dont l'hélice est installée, on
naîtra qu'elle doit présenter un avantage sur les roues, pour
vigation sur mer ; c'est que son action est toujours très régu-
, tandis qu'il n'en est pas de même des roues. Le bateau
linant, tantôt d'un côté, tantôt de l'autre, les deux roues se
vent inégalement plongées, et par suite les pressions qu'elles
uvent de la part de l'eau sont quelquefois très différentes l'une
'autre ; il en résulte que le bateau tend à se détourner de sa
te. L'hélice, au contraire, agit toujours de la même manière.
le que soit l'inclinaison que prenne le bateau dans un sens ou
s l'autre ; elle lui transmet constamment une pression dirigée
s le sens de son axe.
L'expérience a fait reconnaître en effet que l'emploi de l'hélice,
me moyen de propulsion des navires sur mer, est préférable
'emploi des roues, toutes les fois que la navigation ne s'effectue
s dans les conditions de régularité qui existent dans les temps
mes ; et que, même lorsqu'on se trouve dans ces conditions de
gularité, l'hélice produit d'aussi bons effets que les roues. Mais
avantage de l'hélice est compensé en partie par l'inconvénient
i résulte de ce qu'elle doit recevoir un mouvement de rotation
trêmement rapide, ce qui use en très peu de temps les supports
ns lesquels tourne son axe.

§ 336. Quand on se sert de rames, de roues, ou d'hélices, pour
re mouvoir un navire, on est obligé de développer une quan-
é de travail beaucoup plus grande que celle qui est strictement
cessaire en raison des résistances qui s'opposent au mouvement
navire. Pour le reconnaître, il suffit d'observer que ces divers
pareils de propulsion ne peuvent recevoir de l'eau la pression mo-
ce dont on a besoin, qu'autant qu'ils donnent à une certaine
sse d'eau un mouvement dirigé en sens contraire de celui qu'ils
vent transmettre au navire. Toute la portion du travail moteur
i est employée à produire ce mouvement de l'eau est en pure
te : et c'est ce qui fait qu'il existe une différence très grande
tre le travail moteur total développé par le moteur qui met l'ap-
reil de propulsion en mouvement, et le travail résistant occasionné
r les résistances que le navire a à vaincre.

La perte de travail dont il est ici question est due à ce que,
ur pousser le navire en avant, on prend son point d'appui sur
corps qui n'est pas fixe, sur l'eau même dans laquelle le navire
t plongé. Si l'on pouvait s'appuyer sur des corps fixés au fond de



conséquence, prendre un mouvement en sens contr
la locomotive doit donner au convoi.

Pour faire disparaître la grande perte de travail
signalée, on a imaginé un moyen de donner aux b
un appui fixe, qui leur permet de marcher, sans r
l'ordinaire, une grande masse d'eau en mouvemen
traire de leur mouvement propre. Ce moyen, qui n
ployé avec avantage que dans un petit nombre de
consiste à installer au fond de l'eau une longue ch
dans toute la longueur du chemin que doit parcou
solidement fixée au sol à ses deux extrémités. Le ba
en un point de son parcours, la chaîne le traverse
sa longueur, et s'y trouve engagée dans la gorge
poulie dans laquelle elle ne peut pas glisser. La ma
qui est installée sur le bateau, est employée uni
tourner cette poulie, qui tend à entraîner la chaîne,
ser successivement ses diverses parties dans sa gor
traînerait en effet si elle n'était pas fixée au sol a
mités. La chaîne ne pouvant pas céder à la force
lui est ainsi appliquée, c'est le bateau qui se dépla
rant dans toute sa longueur. Il existe à Paris un ba
ce genre, qui fonctionne comme nous venons de le di

ace. Pour trouver ce mouvement absolu, il faut regarder le
re comme étant animé à la fois de deux mouvements, dont
est le mouvement de l'eau sur laquelle il flotte, et l'autre est
mouvement par rapport à cette eau ; en composant à chaque
ant les vitesses qu'il possède en vertu de ces deux mouvements
03), on trouvera sa vitesse absolue dans l'espace.

est ainsi que, lorsqu'on veut traverser une rivière en bateau,
ant une direction perpendiculaire à celle du courant, on est
gé de diriger le bateau et de manœuvrer les rames comme si
voulait traverser la rivière obliquement, en remontant le cou-
t. Si l'on agissait comme si l'eau était en repos, on irait rejoindre
tre bord en un point qui, au lieu de se trouver en face du point
départ, serait situé beaucoup plus bas.

Si le mouvement du navire a la même direction que celui de l'eau
s laquelle il se meut, sa vitesse absolue sera égale à la somme
à la différence de la vitesse de l'eau et de sa vitesse par rap-
t à l'eau, suivant qu'il marchera dans le sens du courant ou en
s contraire. Supposons, par exemple, qu'un bateau à vapeur,
rchant dans une eau tranquille, y prenne une vitesse de 5^{m} par
conde, et qu'on le fasse marcher sur une rivière dont le courant
une vitesse de 2^{m} par seconde : sa vitesse absolue sera de 7^{m} ou
3^{m} par seconde, suivant qu'il descendra ou qu'il remontera le
urant.

Il est clair, d'après cela, qu'un bateau à vapeur ne pourra re-
nter un courant qu'autant que la vitesse qu'il prendrait dans une
tranquille sera plus grande que la vitesse du courant. Dans le
contraire, si le bateau cherchait à remonter le courant, il serait
traîné par l'eau, et marcherait en sens contraire du sens dans
uel il tend à marcher, avec une vitesse égale à l'excès de la vi-
se du courant sur celle qu'il prend par rapport à l'eau.

§ 338. **Cerf-volant.**—Tout le monde connaît les cerfs-volants
servent de jouets aux enfants, et que l'on élève en l'air au
yen du vent. Il est aisé de se rendre compte de la manière dont
peuvent être soutenus dans l'atmosphère par l'action de l'air. Un
f-volant est une sorte de grande raquette, dont le cadre est
mé au moyen de baguettes légères, et dont la surface est recou-
te de papier collé sur ce cadre; une baguette droite le traverse
s toute sa longueur, et en forme, pour ainsi dire, l'axe. Si l'on
sente cette surface de papier au vent, de manière que les mo-
ules d'air viennent la rencontrer perpendiculairement, elle éprou-
a une pression dont l'intensité dépendra de la grandeur de la
face et de *la vitesse du vent* (§ 330). On conçoit qu'il existe un

certain point tel, que si le cerf-volant était soutenu en ce
pour résister au vent, il se maintiendrait en équilibre sa
surface s'inclinât ni d'un côté ni de l'autre : ce point est
peut appeler le centre de pression. Si une ficelle était at
ce point même, et qu'elle fût retenue assez fortement à
extrémité, de manière à s'opposer à l'action du vent, l
exercée par l'air sur la surface serait vaincue par la t
cette ficelle. Mais si la ficelle est attachée à l'axe du cerf-v
dessus du centre de pression, il n'en sera plus de même :
de la ficelle ne pourra plus détruire la pression du vent.
sion poussera en arrière la partie inférieure du cerf-v
prendra ainsi une position inclinée, et qui tendra à se p
zontalement. Mais, d'un autre côté, le poids du cerf-vola
tout le poids de la queue, que l'on attache à sa partie
s'opposent à ce que sa surface s'approche trop de la po
zontale. La pression exercée par l'air, étant toujours p
laire à la surface du cerf-volant, sera donc également
dirigée de bas en haut : c'est cette pression qui fait mo
reil, tant qu'elle l'emporte sur la résultante de son poi
tension de la ficelle.

§ 339. **Navigation aérienne.** — Dès qu'on eut trou
de s'élever dans l'atmosphère à l'aide des ballons, on eu
profiter pour effectuer des voyages. Mais, pour réalise
il fallait pouvoir faire marcher à volonté un ballon
telle direction. Bien des tentatives ont été faites jus
pour arriver à la solution de cette question, et les résu
jours été à peu près nuls ; on se demande même s'il es
réussir dans de pareilles tentatives. En analysant c
question de la direction des ballons, il ne nous sera p
nous rendre un compte exact de sa nature, et de voi
certain point, combien on peut compter en trouver
complète.

Imaginons qu'un ballon soit en équilibre dans une c
mosphère, et que l'air de cette couche soit absolum
Sera-t-il possible, en manœuvrant un appareil conve
au ballon, de déterminer un mouvement de transpo
machine, dans telle direction qu'on voudra ? Il n'est p
répondre à cette question. D'abord il est bien clair qu
ment qu'on pourra produire un mouvement dans
direction, on pourra tout aussi bien le produire dans u
que l'air dans lequel se trouve le ballon est supposé im
leurs il suffira d'employer un gouvernail, analogu

[redacted]

ans les navires (§ 332), pour changer à volonté la direc-
ıvement, une fois qu'il aura été produit. Reste à voir
ble en effet de déterminer un mouvement de translation
ıns cet air immobile. C'est ce dont on ne doit pas dou-
rvant qu'il suffirait pour cela de lui adapter des appa-
ıes aux ailes des oiseaux, et susceptibles de se mouvoir
manière. Des appareils de ce genre, animés d'un mou-
va-et-vient, et présentant une grande surface à l'air.
mouvraient dans un sens, tandis qu'ils ne lui présen-
leur tranche lorsqu'ils reviendraient en sens contraire.
eraient certainement au ballon un mouvement de trans-
ı de ces espèces de rames à large surface, on pourrait
ervir d'hélices semblables à celles que l'on adapte aux
335). Mais, si l'on réfléchit à la grandeur que doit néces-
voir un ballon pour pouvoir porter quelques personnes, et
ıent à la grande surface avec laquelle il doit rencontrer
on mouvement, on se convaincra qu'un appareil de pro-
el qu'il soit, étant mû par des voyageurs, ne pourra don-
ire aérien qu'une faible vitesse. On peut avoir, il est
de faire porter par le ballon une machine motrice, telle
chine à vapeur, par exemple. Mais si l'on augmentait par
dont on pourrait disposer pour faire mouvoir l'appareil
on, on augmenterait aussi considérablement le charge-
ıllon : son volume devrait s'accroître en conséquence, et
erait une augmentation de la résistance à vaincre pour
ıne même vitesse.

s probable que, quelle que soit la disposition adoptée,
le transport qu'on pourra donner à un ballon, au milieu
anquille, sera toujours petite. Ajoutons à cela que, si
t espérer d'arriver à produire un mouvement plus ra-
employant une autre force que celle des voyageurs, et
quent en donnant à la machine entière des dimensions
plus grandes que celles qui ont été données aux ballons
sent, l'appareil de propulsion devrait être lui-même très
aussi léger que possible, et par suite extrêmement diffi-
œuvrer d'une manière convenable ; cet appareil éprou-
ssairement de fréquentes avaries, qui le mettraient sou-
l'état de fonctionner.

ons maintenant ce qui se passerait, si l'on cherchait à
oir un ballon au milieu d'une couche d'air animée elle-
ı mouvement. Le ballon prendrait une vitesse absolue,
la résultante de la vitesse de la couche d'air et de sa



couche d'air immobile, ou animée d'une faible vitess
d'après les relations des voyages aérostatiques, qu'i
les couches d'air dans lesquelles ces voyages se sont ef
eu qu'une faible vitesse : habituellement un ballon
moins d'une heure à un grand nombre de kilometre
départ. On doit donc regarder la question de la dire
lons à volonté comme n'étant susceptible d'une sol
que pour des circonstances atmosphériques qui ne
qu'exceptionnellement. Le plus souvent un ballon, m
reil de propulsion, ne pourrait pas lutter contre le
l'air au milieu duquel il serait plongé. Ajoutons à
pourrait pas même espérer de réaliser une véritab
aérienne, à la condition d'attendre, pour le départ, qu
fût dans des conditions convenables ; car, d'une p
souvent obligé d'attendre très longtemps, et d'une au
verait ordinairement que l'atmosphère ne se maintien
de telles conditions, pendant la durée du voyage
effectuer.

On peut établir un parallèle entre la navigation
navigation aérienne. Les bateaux et les navires, mus
des roues, ou des hélices, peuvent marcher dans tou
une eau tranquille : ils peuvent aussi être dirigés à v

ent dans les mêmes conditions qu'un bateau à vapeur auquel on voudrait faire remonter un torrent.

MACHINES QUI SERVENT A ÉLEVER LES LIQUIDES.

§ 340. L'élévation des liquides, et principalement de l'eau, entre pour une forte proportion parmi les divers travaux que l'on exécute à l'aide de machines. Tantôt on a besoin d'enlever l'eau de cavités plus ou moins profondes, afin de pouvoir s'y installer, et y travailler, soit à des constructions, soit à des exploitations de mines; tantôt on veut élever, à une faible hauteur, une partie des eaux d'une rivière, pour les employer à des irrigations; tantôt on veut faire monter de l'eau ou différents liquides, soit pour les usages domestiques, soit pour les besoins d'un établissement industriel. Un grand nombre de machines ont été imaginées pour remplir ces diverses objets : nous allons en faire connaître les dispositions générales.

La quantité de travail nécessaire pour élever une certaine masse d'un liquide à une hauteur déterminée s'obtiendra toujours en multipliant le poids du liquide à élever, évalué en kilogrammes, par la hauteur à laquelle il doit être élevé, estimée en mètres. Le nombre ainsi obtenu représentera la quantité de travail moteur qu'on devra appliquer à une machine, quelle que soit sa nature, pour qu'elle puisse produire le travail utile qui est représenté par l'élévation de la masse liquide à la hauteur voulue, en supposant toutefois qu'il n'y ait aucune perte de travail occasionnée par l'emploi de cette machine. En réalité, le travail moteur appliqué à une machine destinée à l'élévation d'un liquide sera toujours supérieur au travail utile que cette machine effectuera, parce qu'il est impossible d'éviter complétement les pertes de travail. Ces pertes sont dues en général : 1° aux frottements des parties solides de la machine les unes contre les autres; 2° aux chocs qui peuvent se produire entre ces parties solides; 3° au frottement du liquide contre les parois entre lesquelles il se meut; 4° aux changements brusques de grandeur ou de direction qui peuvent survenir dans la vitesse du liquide; 5° enfin à la vitesse que le liquide possède encore lorsqu'il est arrivé à la hauteur à laquelle il devait être élevé, vitesse qui est entièrement inutile, et qui n'a pu être donnée au liquide qu'aux dépens d'une portion du travail moteur appliqué à la machine. Quand on veut établir une machine pour élever un liquide, on doit toujours avoir en vue ces diverses causes de perte de travail, afin d'en atténuer l'effet autant que possible, au moyen de dispositions convenables.

Les diverses machines qui servent à élever les liquides diff
les unes des autres en raison du volume plus ou moins grand
liquide qu'elles doivent déplacer, et de la hauteur plus ou moi
considérable à laquelle elles doivent le monter. Mais il existe
plusieurs espèces de machines qui peuvent être employées indisti
tement dans les mêmes circonstances; pour choisir, entre ces
verses machines, celle qu'on devra adopter, on les comparera
le rapport de la perte totale de travail que chacune d'elles pe
occasionner par sa nature, et aussi sous le rapport de la facilité
ou moins grande d'installation et de manœuvre que chacune d'
présentera. Si la machine ne doit fonctionner que momentané
pour être enlevée ensuite, la facilité d'installation devra entrer
beaucoup dans le choix qu'on fera; si au contraire la machine
demeurer dans le lieu où on l'installera, et y fonctionner pe
un temps un peu long, on devra surtout avoir en vue de dimi
autant que possible, les pertes de travail, et adopter celle qu
capable de produire le plus d'économie sous ce rapport.

§ 341. **Chapelet.** — Le chapelet est une machine destinée à
l'eau à une petite hauteur: on l'emploie surtout pour les é
ments qu'on a besoin d'effectuer dans les lieux où l'on co
au-dessous du niveau d'un cours d'eau, par exemple, dans le
structions des ponts et des moulins à eau. A cet effet, on
un barrage, de manière à isoler le lieu où la construction
faire du reste du cours d'eau; puis, à l'aide du chapelet, on
l'eau contenue à l'intérieur de ce barrage. On renouvelle d'a
l'action de la machine de temps en temps, pendant la dur
travaux, afin de retirer l'eau qui filtre peu à peu à travers l
rage, et qui en s'accumulant pourrait gêner les ouvriers.

Le chapelet consiste en une chaîne sans fin, *fig.* 396, for
chaînons de fer articulés les uns aux autres, et munie de d
qui sont fixés perpendiculairement au milieu de chaque ch
Cette chaîne s'engage sur le contour de deux roues A et B.
sant tourner la roue A, on entraîne la chaîne, qui fait elle
tourner la roue B. Dans ce mouvement, les diverses portion
chaîne montent d'un côté, et descendent de l'autre côté, comm
diquent les flèches. La partie ascendante de cette chaîne se
engagée dans un tuyau, dont les dimensions transversales
peu plus grandes que celles des disques fixés aux chaînons,
plonge par sa partie inférieure dans l'eau à épuiser. Chaq
qu'un disque, en montant, vient pénétrer dans le tuyau,
au-dessus de lui une certaine quantité d'eau qui s'y était
duite; à mesure qu'il s'élève, il fait monter cette eau av

e ainsi soulevée jusqu'à la partie supérieure du tuyau, verse latéralement. Les dimensions des disques du cha-

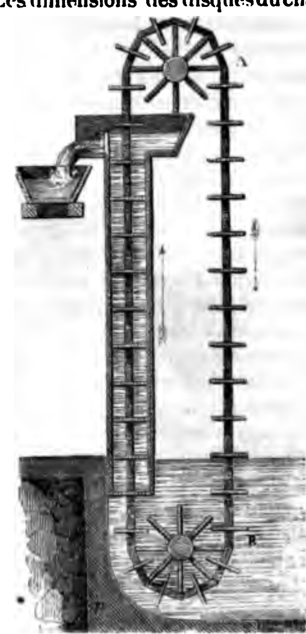


Fig. 396.

n peu moins gran- s de la section in- uyau, afin d'éviter nts ; mais la diffé- re aussi petite que ns quoi l'eau pas- p grande quantité rvalles qui existe- les disques et le en résulterait une correspondante se d'eau élevée.

au lieu de dispo- let verticalement, venons de le voir, une position incli- 7. Dans ce cas, le ur du tuyau peut en sorte qu'il se simple canal de lequel circule, en me des parties de ns fin qui constitue

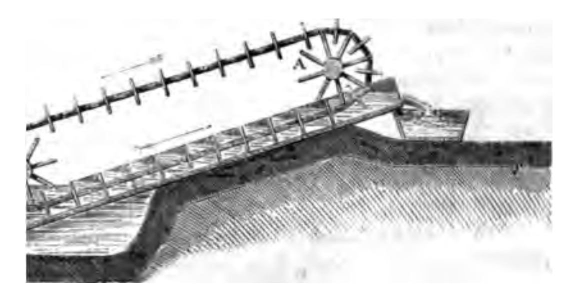


Fig. 397.

oria. — *La noria* est une machine qui a une grande

analogie avec le chapelet. Elle se compose, comme lui, d'une chaîne sans fin qui s'engage sur le contour de deux roues, et que l'on met en mouvement de la même manière. Mais, au lieu que la chaîne porte des disques qui doivent faire monter l'eau au-dessus d'eux, dans un tuyau ou dans un canal incliné, elle est munie dans toute sa longueur de godets qui sont destinés à contenir le liquide à élever. Ces godets montent et descendent successivement, comme les disques du chapelet. Lorsqu'ils sont à la partie inférieure de leur course, ils s'emplissent d'eau ; ils montent avec l'eau qu'ils contiennent, et doivent avoir par conséquent, en montant, leur ouverture tournée vers le haut ; arrivés près de la roue supérieure, ils tournent autour de cette roue, se vident en s'inclinant, puis redescendent, ayant l'ouverture tournée vers le bas, pour venir s'emplir de nouveau dans la masse d'eau qui doit être élevée. Le tuyau vertical, ou le canal incliné, dans lequel s'engagerait la partie ascendante de la chaîne sans fin, dans le chapelet, n'existe pas dans la noria ; sa présence serait tout à fait inutile.

La noria n'est pas seulement employée à des épuisements d'eau. On s'en sert souvent, dans les établissements industriels, pour élever différents liquides à des étages supérieurs, et même aussi pour élever des corps solides réduits à l'état de poussière. C'est ainsi que, dans les moulins à farine, on emploie des norias pour faire monter le mélange de son et de farine, qui sort des meules, et l'amener dans les appareils destinés à opérer la séparation de ces deux substances.

Les machines à draguer, dont on se sert pour enlever les sables qui gênent la navigation dans le lit d'une rivière, ne sont autre chose que des norias, dont les godets descendent au fond de l'eau et s'y emplissent de sable, qu'ils remontent ensuite pour le verser dans un bateau destiné à l'emmener. Dans ce cas, les godets son percés sur toute leur surface d'un grand nombre de petits trous, pa lesquels s'écoule l'eau qui s'y trouve mêlée au sable. Ces machine sont installées sur les flancs d'un bateau, que l'on promène da toute l'étendue des lieux où le lit de la rivière a besoin d'être ap profondi ; elles sont mises en mouvement, soit par un manége cheval, soit par une machine à vapeur que porte le bateau dra gueur.

§ 343. **Vis d'Archimède.** — On emploie encore très souvent, po effectuer des épuisements à de petites profondeurs, une machi en forme de vis, qui a été imaginée par Archimède, et qui por son nom. Pour faire comprendre comment cette machine fonctionn réduisons-la à sa plus grande simplicité. Concevons qu'un tube verre ait été enroulé autour d'un cylindre, de manière à y pré

[redacted]

e d'un filet de vis, *fig.* 398; et que l'appareil ainsi con-
étant installé dans une position inclinée, puisse recevoir un
ment de rotation autour de l'axe du cylindre, à l'aide d'une

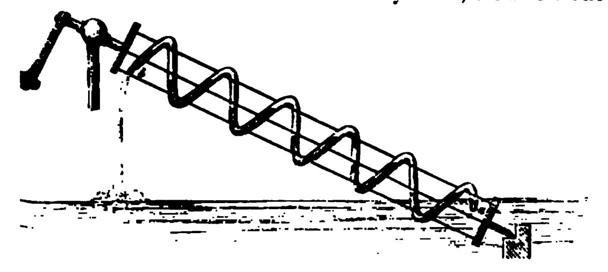


Fig. 398.

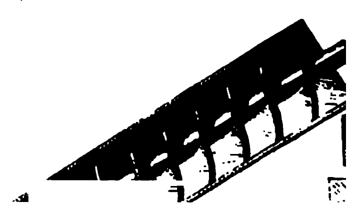
elle fixée à son extrémité supérieure. Quand on fera tourner
achine, l'extrémité inférieure *a* du tube de verre décrira une
férence de cercle, dont le plan, perpendiculaire à l'axe du
re, sera incliné à l'horizon. Si une portion de cette circonfé-
plonge dans l'eau, l'extrémité *a* du tube de verre pénétrera
e liquide, puis en sortira, y pénétrera de nouveau, et ainsi
e. Au moment où cette extrémité du tube sortira de l'eau,
contiendra une certaine quantité de liquide, qui se trouvera
solée, et qui, pendant la rotation de la machine, viendra à
instant occuper la partie inférieure de la spire dans laquelle
engagée. Cette eau, contenue dans le tube, marchera donc
ssivement le long du cylindre, et finira par s'écouler à sa
supérieure.

aque tour que l'on fera faire au cylindre, une nouvelle quan-
liquide s'engagera dans le tube, qui en contiendra ainsi dans
e de ses spires. Ces masses d'eau, qui sont élevées simul-
nt, sont séparées les unes des autres par l'air qui s'est
it dans le tube pendant que son extrémité *a* était au-dessus
surface libre du liquide à élever. En étudiant avec soin
che de l'appareil, on reconnaît que la quantité d'air qui
duit ainsi dans le tube n'est pas suffisante pour remplir
tement l'espace compris entre deux masses d'eau succes-
en conservant la même force élastique: cet air est donc
de se dilater, et il en résulte que la pression atmosphérique,
xerce librement par l'extrémité *b* du tube, fait retomber une
n de chaque masse d'eau dans la spire qui est au-dessous.
Pour éviter cet inconvénient, on peut pratiquer sur le



l'eau, à chaque tour que l'on fait faire au cylindre,
qui s'introduirait dans le tube ne serait pas sépa
liquide, et ne pourrait pas être élevée ; on voit en
de verre, et le réservoir inférieur dans lequel il plo
dans ce cas un système de vases communiquants,
séquent, les surfaces libres, dans le tube et dans
vraient toujours se trouver à un même niveau.
petites ouvertures pratiquées tout le long du tube,
parlé il n'y a qu'un instant, peut cependant mod
en permettant à l'air extérieur de s'introduire dan
séparer une certaine quantité d'eau du reste du li

Les vis d'Archimède, telles qu'on les emploie p
épuisements, ne sont pas construites comme celle
de parler. Elles se composent d'un cylindre intér
noyau, *fig.* 399 ; d'une cloison contournée autour



bords extérieurs de cette cloison. Une moitié de cette été enlevée sur la figure, pour faire voir la disposiıre, ainsi que la manière dont l'eau s'y place sur les :es de la cloison. Souvent, au lieu d'une seule cloison ›n en met deux, et même trois, qui s'étendent dans ;ueur du noyau, en tournant autour de lui dans le même ant parallèles entre elles : c'est ce que montre la *fig*. 399, ;ue la vis est formée de deux cloisons de ce genre. Habidans les vis d'Archimède construites de cette manière, rculer librement à l'intérieur, tout le long du noyau, et ›ntre pas, en conséquence, les inconvénients qui pourer de la dilatation de l'air emprisonné entre les masses ›ntiennent deux spires successives. Par la même raison, plus indispensable que la base inférieure du cylindre u'en partie dans l'eau qu'il s'agit d'élever.

le hollandaise. — On emploie beaucoup, en Hollande, e d'épuisement qui n'est qu'une modification de la vis :. Imaginons que, dans cette vis, *fig*. 399, on ait sup'eloppe cylindrique qui ferme extérieurement l'espace re les spires successives des cloisons, il ne restera plus sons et le noyau central auquel elles sont fixées. Con›lus qu'une pareille vis soit installée à l'intérieur d'un rique, dans lequel elle puisse tourner, de manière que térieurs des cloisons dont elle est formée soient presque ıvec les parois de ce canal : on aura ainsi la vis holı lui donnant un mouvement de rotation, on élèvera de ıussi bien qu'avec la vis d'Archimède. Une portion de pourra retomber dans le réservoir inférieur, en passant ›rds des cloisons et les parois du canal : pour diminuer :ravail qui résulte de cette circonstance, on a soin de ne :e la vis et le canal cylindrique dans lequel elle tourne, écessaire pour qu'il n'y ait pas de frottement. L'inconvient d'être signalé est compensé d'ailleurs par un : la vis hollandaise sur la vis d'Archimède. Dans cette ıchine, tout le poids de l'eau que contient la vis est ır son axe ; dans la vis hollandaise, au contraire, les canal qui l'enveloppe en partie supportent une des s du poids de cette eau, composante qui est dirigée per:ment à la longueur du canal, tandis que la vis n'a à ue l'autre composante qui est parallèle à son axe : il en les frottements de l'axe sur ses supports sont moins *la vis hollandaise* que dans la vis d'Archimède.

Des vis de ce genre sont employées en grand nombre en Hollande, pour rejeter, par-dessus les digues, les eaux qui se répandent sur les terrains bas, et qui proviennent, soit des pluies, soit des infiltrations. Ces machines sont mises en mouvement par des moulins à vent.

On emploie assez souvent des vis entièrement analogues aux vis hollandaises pour transporter à une petite distance des corps solides réduits en poussière. A cet effet, on installe une vis horizontalement, dans une sorte de canal dont elle occupe toute la longueur. Cette vis, à laquelle on donne un mouvement de rotation autour de son axe, saisit les poussières accumulées dans un réservoir placé à l'une des extrémités du canal : elles se trouvent ainsi engagées entre ses spires, et sont conduites jusqu'à l'autre extrémité, où elles tombent dans un second réservoir. Dans les moulins à farine, on se sert concurremment de la vis dont nous parlons et de la noria (§ 342), pour transporter d'un point à un autre de l'établissement le mélange de son et de farine qui sort des meules ; la première est affectée spécialement au transport de ce mélange dans un sens horizontal, et la seconde au transport dans le sens vertical.

§ 345. **Roue à palettes.** — On se sert quelquefois, pour élever l'eau à une faible hauteur, d'une grande roue dont la circonférence est garnie de palettes planes. La *fig.* 400 représente une roue de ce genre, qui est établie à la gare de Saint-Ouen, près Paris. Elle est destinée à faire monter de l'eau prise dans la Seine, pour entretenir un niveau suffisamment élevé à l'intérieur de la gare. A partir du bas de la roue, les palettes, en remontant, se meuvent dans un coursier cylindrique : de chaque côté existe également un mur vertical qui s'élève à une hauteur convenable : en sorte que les palettes se trouvent ainsi emboîtées exactement dans leur contour, et l'eau qui s'engage entre elles est obligée de les suivre dans leur mouvement ascendant. Lorsqu'une palette chargée d'eau arrive en A, cette eau s'écoule par-dessus la crête du coursier circulaire, et se rend de là dans la gare. On a donné aux palettes une certaine inclinaison, par rapport au rayon auquel elles correspondent, afin de faciliter cet écoulement.

La roue est mise en mouvement par une machine à vapeur, qui agit sur elle par l'intermédiaire d'une roue dentée que l'on voit sur la figure. Cette roue dentée engrène avec les dents que porte intérieurement une des couronnes auxquelles sont adaptées les palettes. D'après la manière dont l'action de la machine à vapeur est ainsi transmise à la roue à palettes, on voit que l'axe de cette roue n'est pas très fortement chargé par la masse d'eau qu'elle soulève, et qu'en conséquence la pression de cette masse d'eau sur les palettes

nne pas lieu à des frottements beaucoup plus grands que si
e marchait à vide; car la roue dentée qui fait tourner la roue
ttes exerce sur elle une pression de bas en haut, qui détruit
nde partie la pression résultant du poids de l'eau soulevée.

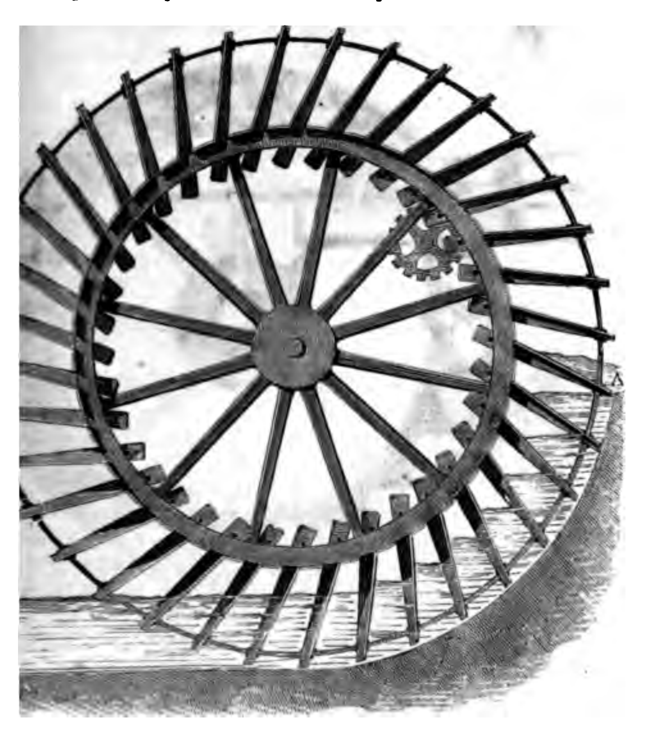


Fig. 400. (Échelle de 8 millimètres pour mètre.)

346. **Roue élévatoire.** — Les *fig*. 401 et 402 représentent
oue d'une autre espèce, qui est destinée à remplir le même objet
celle dont nous venons de parler. Cette roue, à laquelle on
e le nom de *roue élévatoire*, porte à sa circonférence un
l nombre de compartiments ou augets qui doivent contenir
à élever. La roue étant animée d'un mouvement de rotation
un sens convenable, les augets viennent plonger dans le bief

A, *fig.* 401 ; ils s'y emplissent d'eau, par l'extérieur de l
ils montent pleins jusqu'à une certaine hauteur ; enfin ils
l'eau dans les caisses B, C, par des ouvertures pratiquées
rieur de la roue, et de là elle se rend dans les canaux D,

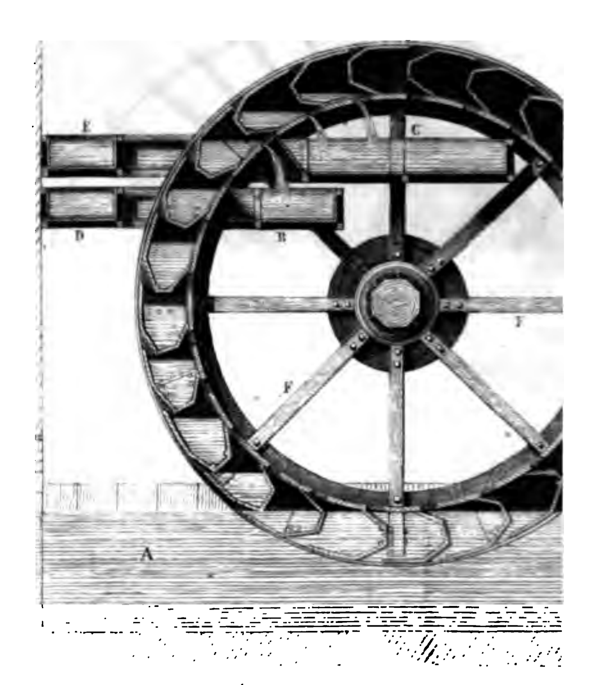


Fig. 401. (Échelle de 12 millimètres pour mètre

lesquels elle s'écoule. Les bras F, qui relient le contour
à l'arbre central, n'occupent pas toute la largeur de l
402 ; c'est ce qui permet aux caisses B, C, de pénétrer
rieur, de part et d'autre de ces bras, sans cependant
mouvement. Un moteur hydraulique, placé à côté de la
toire, fait tourner l'arbre G ; et le mouvement est tr
roue par l'intermédiaire d'un engrenage.

On voit qu'ici l'arbre de la roue supporte tout le po
élevée, ce qui détermine des frottements considérables

[redacted]

ité, il n'y a pas à craindre les pertes d'eau qui se produi-
ujours dans la roue précédente, entre les palettes et le
, pertes qu'on ne peut pas éviter complétement par une
onstruction, et qui obligent de donner à la roue une vitesse
grande.

ue que représentent les *fig.* 401 et 402 est établie à Ciry
e, près de Soissons ; elle y est employée à élever une partie

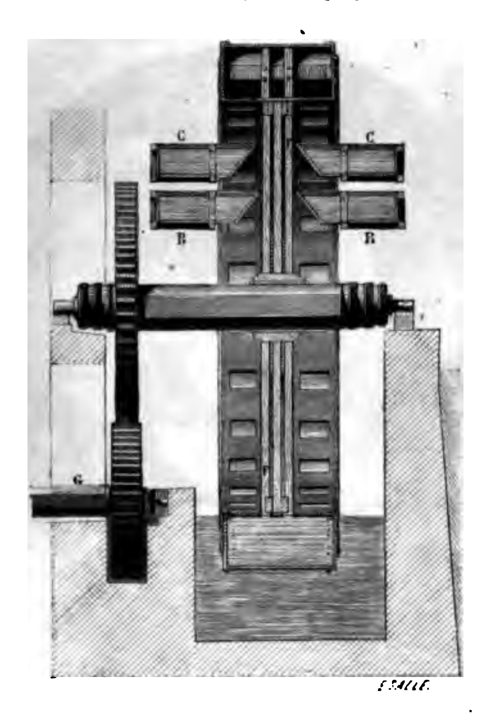


Fig. 402.

x de la riviere de Vesle, pour les faire servir a des irrigations.
l E, *fig.* 401, conduit l'eau sur les points les plus élevés des
à irriguer ; le canal D, alimenté par les caisses B qui reçoi-
premières masses d'eau sorties des augets, mène cette eau
parties plus basses.

§ 347. **Tympan.** — Le *tympan*, *fig.* 403 et 404, a de l'analogie avec la roue élévatoire; il en diffère en ce que, puisant l'eau à sa circonférence, il la déverse près de son axe. Il consiste en un tambour creux, mobile autour de son axe, et dans lequel sont des cloisons contournées en spirale; ces cloisons partent du centre, et s'étendent jusqu'à la circonférence. Le tympan plonge, par sa partie inférieure, dans l'eau qu'il s'agit d'élever; cette eau s'intro-

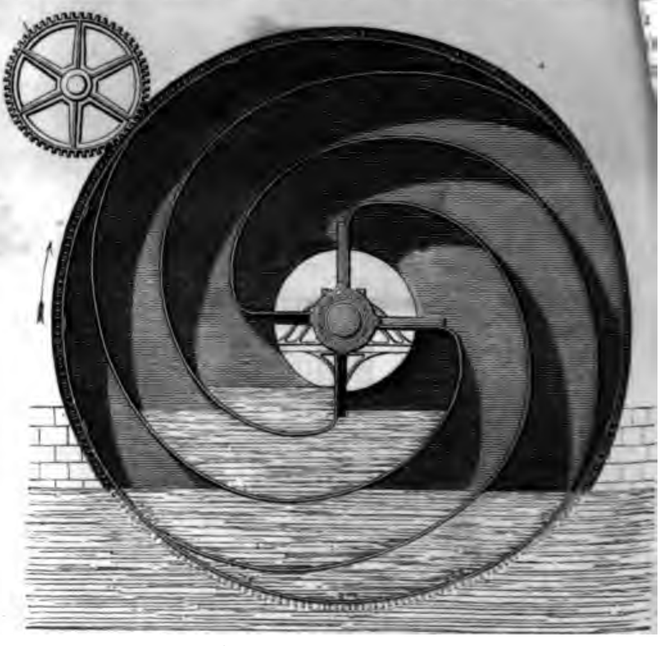


Fig. 403. (*Échelle de 13 millimètres pour mètre.*)

duit entre les cloisons, et s'y maintient au même niveau qu'à l'extérieur, tant que la masse d'eau intérieure ne se trouve pas isolée. Mais, lorsque le tympan est animé d'un mouvement de rotation, dans le sens de la flèche, les extrémités des cloisons viennent sortir de l'eau les unes après les autres : les masses d'eau contenues dans chacune d'elles se trouvent donc successivement séparées du reste du liquide. Chaque masse d'eau, étant ainsi isolée, tend con-

[redacted]

à se placer au point le plus bas de la cloison courbe qui la mesure que le tympan tourne, cette eau se trouve soule coule en même temps le long de la cloison, de manière ocher du centre : enfin elle arrive bientôt au niveau de tures centrales qui sont pratiquées sur les deux faces du ; elle s'écoule au dehors, de part et d'autre, par ces ou-

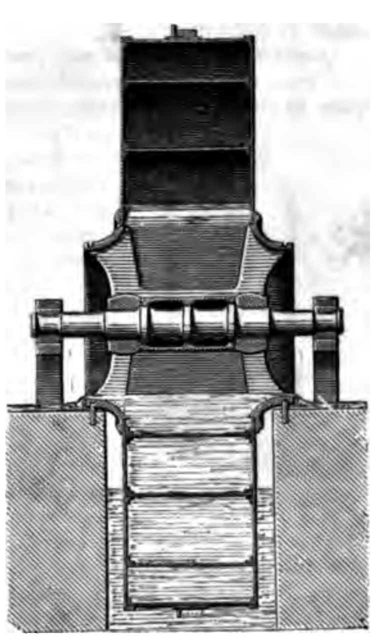


Fig. 404.

ıpan représenté 403 et 404 foncvignon pour éleaux qui servent ions des rizières nargue. Une roue ste sur tout son au milieu de sa ette roue engrène autre plus petite son mouvement et le transmet mpan.

Seaux. — Pour l'eau à une haute grande, et nopour puiser l'eau , on emploie très *seau* que l'on acl'extrémité d'une samment longue. escendre la corde, u qui la termine, e qu'il arrive à il doit enlever Dès qu'il a plongé te quantité dans il se couche sur le côté, s'emplit peu à peu de liquide, e bientôt complétement ; alors on retire la corde, et elle seau plein d'eau.

sez incommode d'opérer en tenant directement dans ses rde à laquelle le seau est attaché, parce que, pour éviter le du seau contre les parois du puits, pendant qu'on le reest obligé de se pencher de manière à éloigner la corde is. Aussi opère-t-on habituellement d'une autre façon.

Le plus souvent la corde s'enroule sur un treuil à manivelle (§ 55) qui s'étend horizontalement au-dessus du puits, et l'on remonte le seau en faisant tourner la manivelle. Outre la commodité que présente cette disposition, on y trouve l'avantage de pouvoir remonter un seau de plus grandes dimensions, soit en employant un treuil dont le rayon soit notablement plus petit que le rayon de la manivelle, soit en ne faisant agir la manivelle sur le treuil que par l'intermédiaire de roues dentées.

Quand on opère, comme nous venons de le dire, au moyen d'un seul seau, attaché à l'extrémité d'une corde, que l'on descend vide pour le remonter plein d'eau, il se présente deux inconvénients qu'il est bon de chercher à éviter, surtout lorsqu'on doit répéter la manœuvre pendant un certain temps sans interruption. Le premier consiste en ce qu'on perd du temps pendant qu'on laisse descendre le seau vide ; le second tient à ce que, lorsqu'on remonte le seau plein, on n'a pas seulement à vaincre le poids de l'eau qu'on élève, mais aussi le poids du seau et celui de la corde. On fait disparaître ces deux inconvénients, en attachant un seau à chacune des extrémités de la corde, et la faisant passer sur une poulie dont la chape est fixée au-dessus de l'orifice du puits, *fig.* 405. Si l'on tire de haut en bas l'une des deux parties de



Fig. 405.

la corde qui se détachent verticalement de la gorge de la poulie, le seau qui est à son extrémité descend ; mais en même temps l'autre monte. On voit que, par là, chaque seau descend vide pendant que l'autre monte plein d'eau ; et de plus les poids des deux seaux se font équilibre par l'intermédiaire de la poulie, ce qui fait qu'on n'a réellement à vaincre que le poids de l'eau qu'on élève. Quant au poids de la corde, qui est souvent de peu d'importance, il agit tantôt comme force résistante, tantôt comme force motrice ; les poids des deux portions de cette corde qui sont situées de part et d'autre de la poulie se neutralisent en partie : l'excès de l'un de ces poids sur l'autre agit seul pour ralentir ou accélérer le mouvement, suivant que le seau plein est plus bas ou plus haut que le seau vide.

§ 349. **Manége des maraîchers.** — Lorsqu'on a besoin d'extraire d'un puits une quantité d'eau assez grande, on peut encore se

[redacted]

ıx : mais alors on leur donne de grandes dimensions, et ils ıt le nom de *tonnes*. En outre on remplace la force des hom- : celle des chevaux ou de la vapeur, pour les faire manœu- ıs le puits.

pouvons donner comme exemple des machines dont on se ıs ce cas, le *manége des maraîchers*, *fig.* 406, qui est tres

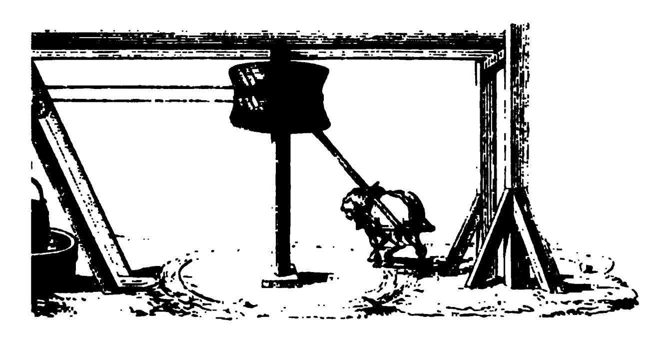


Fig. 406.

ı dans les environs de Paris. Deux poulies sont disposées à ne de l'autre, au-dessus du puits, et à une petite distance re un arbre vertical, qui peut tourner sur lui-même, et qui n tambour à sa partie supérieure. Une corde fait deux ou ırs sur ce tambour, et s'en détache de part et d'autre, pour ısser dans les gorges des deux poulies ; aux deux extrémités corde sont suspendues les deux tonnes qui doivent servir à 'eau. On attèle un cheval à l'extrémité d'un long levier qui à l'arbre du tambour. Ce cheval, en tirant, fait tourner l'ar- corde qui enveloppe le tambour s'enroule d'un côté et se de l'autre : et la tonne vide descend pendant que la tonne ıonte. Lorsque le cheval, en tournant ainsi dans un sens, a ətte dernière tonne jusqu'à l'orifice du puits, on la vide en :ouler l'eau qu'elle contient dans un réservoir placé à côté du ɔendant ce temps la tonne qui est au fond du puits s'est l'eau : on fait alors marcher le cheval en sens contraire, et es se passent comme précédemment.

ue tonne est munie, comme les seaux ordinaires, d'une anse ıelle *elle est suspendue* à l'une des extrémités de la corde ; *te anse n'est pas* attachée en deux points diamétralement

opposés du bord supérieur de la tonne : elle descend plu
saisit deux espèces de tourillons qui sont fixés à la tonne
et d'autre, à une faible distance au-dessus du milieu de sa
Au moyen de cette disposition, on voit que la tonne pleine
tiendra bien d'elle-même dans une position convenable po
perdre l'eau qu'elle contient ; mais qu'on n'éprouvera pas
culté à la faire basculer autour de ces deux tourillons pour
parce que son centre de gravité se trouvera très rappro
ligne qui joint ces points de suspension.

§ 350. **Machine à molettes.** — Pour faire monter l
pleines et descendre les tonnes vides, dans les puits d
soit pour l'épuisement des eaux, soit pour l'extraction des
on se sert de machines entièrement pareilles au manège
raîchers, mais construites avec de plus grandes dimens
deux poulies établies au-dessus du puits portent le no
lettes ; et c'est de là que vient le nom de *machine à mole*
donne à la machine tout entière. Une machine de ce
mise en mouvement par des chevaux ou par une mach
peur.

Ici, comme dans le cas d'une corde qui passe sur
poulie, et qui supporte deux seaux à ses deux extrémités
page 496), les poids des deux tonnes se font équilibre
ment ; en sorte que si l'on fait abstraction du poids du câb
elles sont suspendues, on n'a réellement à vaincre que l
l'eau contenue dans la tonne qui monte. Quant au poids
ainsi que nous l'avons déjà dit, il agira tantôt comme
tantôt comme résistance, suivant que la tonne qui mont
haut ou plus bas dans le puits que la tonne qui descend ;
qui en résultera sera égale à la différence des poids des d
de ce câble qui descendent dans le puits, depuis les mo
qu'aux tonnes. Cette action du poids du câble ne peut p
gligée, surtout si le puits est profond. Elle ne donne
vrai, à aucune perte de travail, si ce n'est celle qui ré
augmentation des frottements ; car, si elle détermine un
ment de résistance pendant une partie du mouvement
chine, plus tard elle produit, au contraire, une dimin
la résistance qu'on aurait à vaincre sans elle : et il y a
pensation exacte. Mais il résulte de cette action variabl
du câble, que la résistance totale à vaincre décroît con
pendant tout le temps qu'une tonne pleine met à monte
du puits à son orifice. Pour obvier à cet inconvénient,
sorte que la résistance agisse sur le tambour de la mac

d'un bras de levier de plus en plus grand, à mesure que ensité diminue ; à cet effet on forme le tambour de deux coniques, sur chacune desquelles doit s'enrouler et se dérou- cessivement une des deux portions du câble. Le câble, en lant sur un de ces cônes, dispose ses spires successives à s unes des autres, et sur des parties de la surface dont le re augmente de plus en plus : le contraire a lieu lorsqu'il se e.

st clair qu'il n'est pas indispensable d'avoir un seul câble qui plusieurs tours sur le tambour, pour s'en détacher de part et e, venir passer sur les molettes, et descendre dans le puits de re à supporter les deux tonnes par ses deux extrémités ; or- ment on en a deux, un pour chaque tonne. Chacun de ces âbles est attaché au tambour par une de ses extrémités ; ils ulent en sens contraire sur ce tambour, et sont disposés de re que lorsque l'un des deux est déroulé, l'autre soit au con- enroulé, de telle sorte que l'une des tonnes soit à l'orifice du orsque l'autre est au fond.

1. **Pompes.**—Dans les diverses machines destinées à élever uides, dont nous avons parlé jusqu'à présent, il existe des mobiles qui puisent le liquide dans le réservoir inférieur, nt progressivement, et ne l'abandonnent que lorsqu'il est par- à la hauteur voulue. Les *pompes* ont aussi pour objet d'élever quides, mais elles fonctionnent d'une tout autre manière. ièces mobiles qui entrent dans leur composition, et qui reçoi- resque toujours un mouvement de va-et-vient, ne se meuvent ellement que dans une très petite portion de la hauteur totale elle le liquide doit être élevé.

e pompe consiste, en général, dans une capacité fermée, dont nensions intérieures peuvent augmenter ou diminuer à volonté, t la communication avec les tuyaux dans lesquels doivent se ir les liquides est successivement établie et interrompue à oments convenables. On donne le nom de *corps de pompe* à ie fixe de cette capacité, qui est ordinairement cylindrique. *on* est une pièce mobile qui se place dans le corps de pompe, apte exactement contre ses parois ; en se mouvant le long des il fait varier l'étendue de l'espace intérieur auquel il sert de C'est au moyen de *soupapes* que l'on établit une communi- intermittente du corps de pompe avec les divers tuyaux né- es au jeu de la pompe.

2. Les *soupapes que l'on* emploie ont des formes très variées ; *indiquerons que les principales*.

La soupape à clapet, *fig.* 407, consiste en une plaque
mobile autour d'une charnière, d
pouvoir s'appliquer exactement s
d'une ouverture pratiquée dans l
porte cette charnière ; cette plaq
nairement doublée de cuir, afin
s'établir un contact plus intime e



Fig. 407.

les bords de l'ouverture qu'elle doit fermer. Souvent la clapet n'a pas de charnière, et est formée d'un simple cuir dont un des bords est cloué à côté de l'ouvertur soupape doit fermer. Dans ce cas, la flexibilité du cuir t charnière, et pour que cette flexibilité n'empêche pas de fermer exactement l'ouverture, on fixe sur sa face une plaque métallique de moins grande dimension, qu une rigidité suffisante, sans cependant s'opposer au qu'elle doit prendre.

La soupape conique, *fig.* 408, consiste en un tronc d
tallique, qui peut fermer exactem
verture dont les bords sont égal
ques. Cette soupape est munie
fixée en son milieu, qui sert à la
son mouvement. A cet effet, l
soupape traverse une bride qui



Fig. 408.

au-dessous, et elle se termine par une tête destinée à soupape de trop s'éloigner de l'ouverture qu'elle doit

La soupape à boulet, *fig.* 409, consiste en une sphè une ouverture circulaire, en venant s'appuyer sur ses
soupape n'a pas besoin d'être dirig
mouvement ; la régularité de forme q
les diverses parties de sa surface fait
toujours exactement l'ouverture, de
qu'elle se présente. On est seulem
disposer, au-dessus de l'ouverture,
muselière destinée à empêcher la so
trop éloigner. Lorsqu'une soupape
pèce doit avoir de grandes dimensi
ordinairement creuse, afin qu'elle n

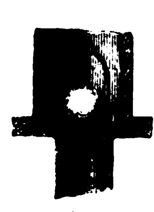


Fig. 409.

pesante : on peut même ainsi régler son poids de telle fonctionne de la manière la plus avantageuse.

§ 353. La forme d'un piston dépend de la forme pompe dans lequel il doit se mouvoir. Le plus ord corps de pompe est un cylindre à base circulaire ;

orme d'un cylindre, *fig.* 410, dont la hauteur est petite que celle du corps de pompe. ·vant toucher les parois intérieures du e par tout son contour, et devant, en glisser facilement le long de ces pa- ırnit habituellement d'étoupes forte- Ces étoupes donnent au contour du ıin degré de compressibilité et d'élas- ermet de s'appliquer bien exactement du corps de pompe, sans cependant un trop grand frottement pendant que ut. Lorsqu'un piston a fonctionné pen-

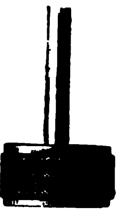


Fig. 410.

emps, les étoupes, s'étant usées, ne remplissent plus leur objet ; elles laissent un certain jeu entre elles et rpsde pompe. On est obligé alors d'ajouter de nouvel- ı bien de faire en sorte que celles qui restent soient dehors dans tout le contour du piston, afin que ce ne un diamètre convenable. Pour qu'on puisse opérer le manière, on forme le piston de deux espèces de dis- pliquent l'un sur l'autre, et qui peuvent être plus ou ıés l'un de l'autre, de manière à faire varier l'épais- qu'ils constituent : les deux disques, ainsi réunis, lais- ur contour une sorte de gorge de poulie, dans laquelle ıiture d'étoupes : et c'est en serrant ces deux disques tre, à l'aide de boulons et d'écrous, qu'on parvient à étoupes, de manière à les repousser au dehors, à garniture s'use.

a besoin de pratiquer, dans le piston ouvertures munies de soupapes, afin ıtercepter alternativement une com- re les deux parties du corps de pompe ·ées l'une de l'autre par le piston. n perce ordinairement le piston de ·s placées de part et d'autre de sa r adapte des clapets, *fig.* 411.

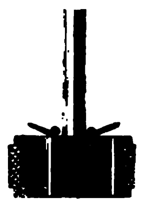


Fig. 411.

eut diviser les pompes en trois classes près la manière dont le piston agit ıter l'eau. La première comprend les *ntes ;* la seconde, les *pompes foulantes ;* et enfin la *pompes aspirantes* et *foulantes.*

ıpe aspirante, fig. 412, le piston A reçoit un mou- *·-vient, à l'intérieur* d'un corps de pompe B, qui com-

munique par un tuyau C avec le réservoir d'où l'eau doit
Une soupape D est établie à l'extrémité supérieure du t
s'ouvre de bas en haut; le
d'ailleurs percé d'une ou d
vertures, dont chacune est
munie d'une soupape. Vers
corps de pompe existe u
téral E, par lequel s'écou
fournit la machine.

Supposons que la pompe
et voyons de quelle maniè
être élevée par le mouvem
qu'on donne au piston. Si
lève, les soupapes dont il
ferment, et la communica
haut et le bas du corps
trouve interceptée; il ten
duire un vide au-dessous
ainsi monter l'eau par aspi
de telle manière qu'elle
en contact avec sa face
même temps il élève l'ea
au-dessus de sa face
la fait couler par le tuya
ce mouvement ascendant
soupape D reste constam
Si ensuite le piston s'ab
s'est élevée dans le co
tend à redescendre d
d'aspiration C; mais la

Fig. 412.

ferme; et l'eau, ne trouvant plus d'issue de ce c
soupapes du piston, et passe au-dessus de lui en
Un nouveau mouvement ascendant du piston fait
tuyau E la masse d'eau qui vient ainsi de se pl
de sa face supérieure; en même temps une nou
d'eau monte dans le corps de pompe, par aspiratio
suite.

Si nous examinons ce qui se passe pendant le m
cendant du piston, nous verrons que, puisque les
porte sont ouvertes, le liquide situé au-dessous de lu
librement avec celui qui est au-dessus; et, en co
pressions qu'il en éprouve de part et d'autre doive

[redacted]

ɔntre elles. Il ne peut y avoir de différence entre ces
s, qu'en raison de ce que les deux faces du piston ne
e même hauteur, et aussi en raison de la difficulté plus
nde que le liquide éprouve à traverser les ouvertures
ns le piston, ouvertures que l'on fait toujours aussi lar-
ɔle. On peut donc regarder le piston, dont le poids agit
ens contraire de la résultante des pressions dont nous
:ler, comme n'ayant aucune résistance à vaincre pour
orps de pompe de haut en bas. Mais il n'en est plus de
e le piston remonte; il fonctionne alors comme un
et supporte des pressions différentes sur ses deux
part du liquide. Sur sa face supérieure, il éprouve la
osphérique, augmentée du poids de la colonne d'eau
ıte; sur sa face inférieure, au contraire, il éprouve la
sphérique, diminuée du poids d'une colonne d'eau, qui
ɔce pour base, et pour hauteur la distance verticale de
à la surface libre de l'eau dans le réservoir d'où l'eau
· la pompe. Donc la différence des pressions supportées
sur ses deux faces, dans son mouvement ascendant,
gardée comme égale au poids d'un cylindre d'eau
ɔse la surface du piston, et pour hauteur la distance
tuyau E au niveau de l'eau dans le réservoir où l'eau

que pour que la pompe puisse fonctionner, il faut que
eure du piston ne se trouve jamais à une distance du
au dans le réservoir plus grande que la hauteur de
'eau qui fait équilibre à la pression atmosphérique,
st moyennement de $10^m,33$ (§ 245) S'il en était autre-
e s'élèverait pas jusqu'à la face inférieure du piston:
it à une certaine hauteur, soit dans le tuyau C, soit dans
ɔmpe, sans suivre le piston dans son mouvement as-
ɔrmerait ainsi une sorte de baromètre à eau.

ɔn commence à faire marcher une pompe aspirante, le
mpe et le tuyau d'aspiration sont remplis d'air. Les
ps de piston ne produisent pas d'écoulement d'eau
E; mais ils ont pour effet de retirer l'air intérieur, et
cer par de l'eau. Si le piston s'abaisse d'abord, l'air
ɛssous de lui, dans le corps de pompe, se comprime;
as sortir par la soupape D qui est fermée, il ouvre les
ɔiston, et se rend dans la partie supérieure du corps de
ston se relevant ensuite, ses soupapes se ferment, l'air
spiration ouvre la soupape D, et se répand dans le

corps de pompe en se dilatant; mais la force élastique de cet air diminue en même temps, et il en résulte que l'eau s'élève d'une certaine quantité dans le tuyau C. Le piston descendant de nouveau, l'air qui vient de passer du tuyau C dans le corps de pompe traverse le piston, pour se rendre dans l'atmosphère; puis, lorsque le piston remonte, une nouvelle quantité d'air passe du tuyau C dans le corps de pompe, et l'eau monte encore dans le tuyau d'aspiration. Après quelques coups de piston, l'eau finit par s'élever jusqu'à l'intérieur du corps de pompe; les dernières portions d'air qui restaient au-dessous du piston sont alors expulsées par le mouvement descendant qu'on lui donne, et la pompe commence à fournir de l'eau.

Une fois que la pompe est *amorcée*, comme on vient de l'expliquer, elle reste pleine d'eau, même lorsqu'on cesse de la faire fonctionner; en sorte que, si l'on veut la faire marcher de nouveau, elle fournit de l'eau dès le premier coup de piston. Cependant, si l'on reste un temps un peu long sans y toucher, il arrive ordinairement qu'elle se vide. Cela tient à ce que les pressions, aux divers points de la colonne d'eau qui est ainsi suspendue au-dessous du piston, sont inférieures à la pression atmosphérique. Cette dernière pression s'exerçant sur toute la surface extérieure de la pompe, il en résulte que l'air s'introduit par toutes les fissures qu'il trouve et pénètre à l'intérieur; il passe notamment entre le contour du piston et la surface intérieure du corps de pompe. A mesure que de l'air entre ainsi dans la pompe, l'eau s'y abaisse; et au bout d'un temps plus ou moins long, suivant que la pompe est plus ou moins bien construite, elle prend dans le tuyau d'aspiration le même niveau que dans le réservoir où plonge ce tuyau. Nous avons dit que la face inférieure du piston ne devait jamais s'élever, au-dessus du niveau de l'eau dans le réservoir inférieur, à une hauteur plus grande que celle d'une colonne d'eau qui ferait équilibre à la pression atmosphérique. Si l'on fait attention à la manière dont le piston fonctionne pour amorcer la pompe, et si l'on tient compte des imperfections qu'une pompe présente toujours, on voit qu'on devra toujours se tenir assez notablement au-dessous de cette limite. L'expérience a fait connaître qu'on ne devait guère donner plus de 8 mètres de longueur au tuyau d'aspiration.

§ 355. Dans la *pompe foulante*, *fig.* 443, un piston plein A reçoit un mouvement de va-et-vient dans un corps de pompe qui plonge lui-même dans le réservoir où se trouve l'eau à élever. Une ouverture B, pratiquée au bas de ce corps de pompe, est munie d'une soupape qui s'ouvre de bas en haut: c'est par cette ouverture que l'eau du réservoir est puisée. Une seconde ouverture C fait commu-

[redacted]

ɜ bas du corps de pompe avec un tuyau D par lequel l'eau ı élevée ; cette ouverture est également munie d'une sou-ıi permet au liquide de passer du corps de pompe dans le), mais qui ne le ıs revenir du tuyau corps de pompe.

ue le piston A s'é-end à faire un vide us de lui ; la sou-ɜ ferme, la soupape e, au contraire, et de pompe s'emplit e piston venant en-descendre, la sou-e ferme ; l'eau con-ıs le corps de pompe rimée ; elle ouvre la C, et passe dans le ıscension D.

ıe grande que soit r à laquelle s'élève d'ascension d'une ılante, l'eau pourra y être conduite par ı, pourvu que l'on ıu piston une force ıent grande. C'est ınstitue une diffé-sentielle entre la

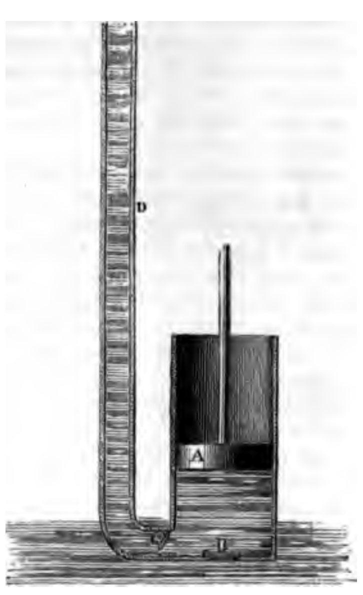


Fig. 413.

ıulante et la pompe aspirante ; puisque cette dernière ː peut faire monter l'eau qu'à une hauteur qui ne dépasse ertaine limite.

ce qu'il faut appliquer au piston d'une pompe foulante, ıire monter dans le corps de pompe, est toujours petite de ce que la pression qu'il éprouve de la part de l'eau sur férieure n'est jamais très différente de la pression atmos- Lorsque le piston descend, il a à vaincre la pression de ssion qui est déterminée par la hauteur à laquelle l'eau ː: cette pression est égale au poids d'un cylindre d'eau pour base la surface du piston, et pour hauteur la dis-ticale de la face inférieure de ce piston au point où l'eau *par la pompe.*

§ 356. La *pompe aspirante et foulante* réunit à elle seule les deux dispositions que présentent les pompes dont nous venons de parler. Concevons que, dans la pompe foulante, *fig.* 413, le corps de pompe ne soit pas placé au milieu du réservoir d'eau, mais qu'il se trouve plus haut, et qu'il soit muni d'un tuyau d'aspiration, partant de l'ouverture B, et plongeant dans ce réservoir. Lorsque le piston s'élèvera, il fera monter l'eau dans le corps de pompe, par aspiration ; lorsqu'ensuite il s'abaissera, il la refoulera dans le tuyau d'ascension. Tel est le principe de la disposition des pompes aspirantes et foulantes.

Souvent on adopte la disposition de la *fig.* 412, avec cette différence que l'eau, au lieu de pouvoir s'écouler par un tuyau latéral E fixé au corps de pompe, est obligée de monter dans un tuyau d'ascension. Lorsque le piston s'abaisse, l'eau qui est au-dessous de lui le traverse, pour passer au-dessus. Lorsqu'il s'élève, il agit à la fois en aspirant l'eau du réservoir, pour la faire monter dans le corps de pompe, et en refoulant l'eau qui se trouve au-dessus de lui, pour l'obliger à monter dans le tuyau d'ascension. Les pompes de ce genre sont quelquefois appelées *pompes aspirantes et élévatoires*, ou simplement *pompes élévatoires*, parce que le piston y élève l'eau sur sa face supérieure. Mais ce sont de véritables pompes aspirantes et foulantes, dans lesquelles le piston refoule l'eau en montant, au lieu de la refouler en descendant.

Lorsqu'on établit une pompe destinée à élever l'eau d'un puits, pour des usages domestiques, on place ordinairement le corps de pompe à l'orifice du puits, et l'eau se trouve élevée uniquement par aspiration. Mais il faut pour cela que la profondeur du puits ne dépasse pas 8m (§ 354). Lorsque la profondeur est plus grande, on est obligé d'installer le corps de pompe dans le puits, et d'employer en conséquence une pompe aspirante et foulante. Dans ce cas, on peut placer le corps de pompe à une hauteur plus ou moins grande au-dessus du fond du puits, pourvu que cette hauteur ne dépasse pas 8m. On se détermine, dans le choix de la place qu'on doit donner au corps de pompe, par des raisons d'économie dans la construction, et de commodité pour l'installation et les réparations ; quant au travail moteur qui devra être appliqué à la pompe, pour lui faire monter une quantité d'eau déterminée, on sait qu'il ne dépendra aucunement de la place qu'on assignera au corps de pompe dans le puits (§ 340).

§ 357. La *fig.* 414 représente la disposition qui est le plus adoptée, pour les pompes destinées aux usages domestiques. Un levier ABC peut tourner autour d'un axe B. En élevant et abaissant successivement l'extrémité A, on donne au point C un mouvement de

[redacted]

ient analogue, mais en sens contraire ; lorsque l'extrémité A
le point C s'abaisse,
ersement. Une bielle
articulée d'une part à
nité C du levier, d'une
part en un point D de
du piston E; en sorte
mouvement de va-et-
lu point C se transmet
ton, qui s'élève et s'a-
ainsi successivement
corps de pompe. Lors-
piston E s'élève, les
soupapes F, G, s'ou-
d'un côté, l'eau du puits
uel la pompe est placée
ve aspirée par le tuyau
nonte dans le corps de
: l'eau, qui surmonte
on, est refoulée d'un
côté par le tuyau I, et
jusqu'au point où ce
aboutit. Lorsque le pis-
baisse, les soupapes F,
erment, celle du piston
e, et l'eau qui existe
e corps de pompe, au-
is du piston, traverse
rture de cette soupape
passer au-dessus. On
ue l'on n'a besoin d'ap-
r une force au levier
pour faire marcher
que lorsque le piston
e, et par conséquent
e l'extrémité A du levier
sse. Cette force doit être
le de vaincre : 1° le poids
colonne d'eau ayant
base la surface du pis-
t pour hauteur la distance verticale du niveau de l'eau dans
s à l'extrémité supérieure du tuyau d'ascension I, poids qui



Fig. 414.

agit au point C du levier ABC; 2° les résistances passives occasionnées par le mouvement de l'eau et des parties solides de la pompe. Pour produire le mouvement descendant du piston, on n'a à vaincre que des résistances passives de peu d'importance.

Ordinairement un petit tuyau latéral, muni d'un robinet K, est adapté à la pompe, vers la partie supérieure du corps de pompe. Lorsqu'on ouvre le robinet K, l'eau s'écoule par ce tuyau latéral, sans s'élever dans le tuyau d'ascension I. La pompe devient alors une simple pompe aspirante.

§ 358. Dans les diverses espèces de pompes que nous venons d'indiquer, le mouvement de l'eau est intermittent, soit dans le tuyau d'aspiration, soit dans le tuyau d'ascension. L'eau ne monte dans chacun de ces tuyaux que lorsque le piston marche dans un sens, et elle s'arrête ensuite pendant qu'il marche en sens contraire, pour reprendre son mouvement lorsque le piston recommence à marcher dans le premier sens. C'est ainsi que dans la pompe foulante, *fig.* 413, l'eau ne se meut dans le tuyau d'ascension que lorsque le piston descend; elle y reste immobile quand il monte. De même, dans la pompe de la *fig.* 414, l'eau ne marche dans le tuyau d'aspiration et dans le tuyau d'ascension, que lorsque le piston s'élève; elle s'arrête dans ces tuyaux pendant qu'il s'abaisse. Ce mouvement intermittent de l'eau détermine une perte de travail, qui est due: 1° à ce que cette eau doit se mettre brusquement en mouvement après chaque temps de repos, ce qui équivaut à un choc; 2° à ce que la vitesse que possède l'eau dans les tuyaux est à chaque instant anéantie, sans produire d'effet, et qu'une certaine quantité de travail doit être employée pour donner cette vitesse à l'eau, chaque fois qu'elle se remet en mouvement.

Pour faire disparaître ce mouvement intermittent de l'eau dans les tuyaux d'aspiration et d'ascension, on a imaginé la *pompe à double effet*, dans laquelle l'eau est aspirée et refoulée en même temps, soit que le piston descende, soit qu'il remonte. Un piston plein A, *fig.* 415, se meut dans un corps de pompe fermé à ses deux extrémités. Quatre ouvertures B, C, B′, C′, situées deux au bas et les deux autres au haut du corps de pompe, le font communiquer d'une part avec un tuyau d'aspiration D, et d'une autre part avec un tuyau d'ascension E; ces ouvertures sont munies toutes quatre de soupapes s'ouvrant dans le sens du mouvement que doit prendre l'eau, pour passer, soit du tuyau d'aspiration dans le corps de pompe, soit du corps de pompe dans le tuyau d'ascension. Lorsque le piston A s'élève, les soupapes B′ et C sont fermées, et les autres B, C′, sont ouvertes: l'eau monte du tuyau D dans la partie inférieure du

ompe, et celle qui est au-dessus du piston est refoulée
yau E. Lorsque ensuite le piston s'abaisse, les soupapes
rment, et les autres
rent ; l'eau du tuyau
n pénètre dans le
ompe par l'ouverture
e qui s'est introduite
nent au-dessous du
efoulée dans le tuyau
n par l'ouverture C.
ie, par là, l'eau est
n mouvement, soit
yau d'aspiration, soit
yau d'ascension.

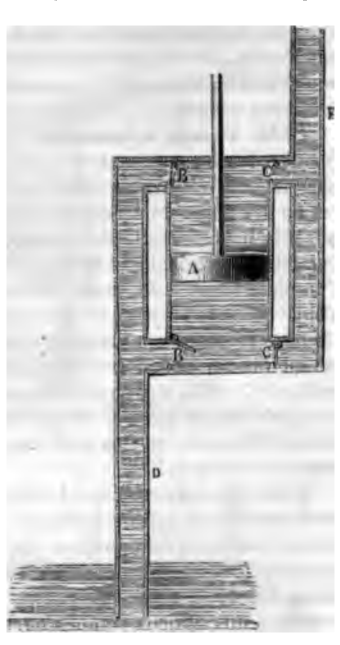


Fig. 415.

mpe à double effet,
omme nous venons
er, fournira, à chaque
ston, deux fois autant
ne pompe à simple ef-
ait les mêmes dimen-
s il ne faut pas voir
itage de la pompe à
et ; car si elle produit
utile double de celui
roduit l'autre pompe,
côté elle exige une
ouble de travail mo-
ce point de vue, elle
d'avantage sur une
imple effet, dont le corps de pompe aurait une capacité
plus grande. L'avantage de la pompe à double effet con-
ement dans la continuité qu'elle donne au mouvement de
les tuyaux d'aspiration et d'ascension.

npe à double effet présente une complication qui rend
du piston et des soupapes plus difficile que dans les pom-
le effet. D'ailleurs on arrive tout aussi bien à donner un
it continu à l'eau dans les tuyaux, en accolant deux pompes
ffet, qui communiquent à un même tuyau d'aspiration et
tuyau d'ascension, et dont les pistons marchent toujours
ntraire l'un de l'autre; lorsque la première de ces deux
it par aspiration, l'autre agit par refoulement, et inver-
ussi emploie-t-on rarement la pompe à double effet, et la

remplace-t-on par deux pompes à simple effet, agissant comme on vient de le dire, et mues par un même moteur. Souvent même, pour arriver à une plus grande régularité dans le mouvement de l'eau le long les tuyaux, on réunit trois et même quatre pompes à simple effet, dont les mouvements se contrarient, de manière à rendre sensiblement constante la quantité d'eau qui est aspirée et refoulée à chaque instant.

§ 359. **Pompe à incendie.** — La pompe dont on se sert pour éteindre les incendies est une pompe foulante. Son tuyau d'ascension est très flexible, de manière à pouvoir être dirigé à volonté sur tel ou tel point de l'incendie, pendant que la pompe fonctionne : aussi la hauteur verticale à laquelle l'eau est élevée dans ce tuyau est-elle très variable, et souvent même elle devient nulle, parce que l'on place l'orifice de sortie du tuyau au niveau du piston. Mais l'objet qu'on se propose, en manœuvrant, cette pompe n'est pas tant de faire monter l'eau jusqu'à l'extrémité du tuyau d'ascension, que de lui donner une vitesse considérable à sa sortie de cette extrémité ; on produit ainsi un jet d'une grande amplitude, que l'on peut diriger d'un peu loin sur les parties où l'on veut arrêter l'incendie. Nous allons voir quelles sont les dispositions que l'on a adoptées pour atteindre ce but.

Il est très important que le jet qui s'échappe du tuyau en sorte avec une vitesse qui ne varie pas sensiblement d'un moment à un autre. C'est pour cela que l'on dispose, à côté l'une de l'autre, deux pompes foulantes qui marchent alternativement, et qui, par leur ensemble, remplacent une pompe à double effet (§ 358). Les pistons *a*, *a*, de ces deux pompes, *fig.* 416, se meuvent en même temps, mais en sens contraire ; lorsque l'un deux descend, l'autre monte, et inversement. L'eau s'introduit dans chacun des deux corps de pompe par les soupapes *b*, *b* ; et, lorsqu'elle est refoulée, elle ouvre les soupapes *c*, *c*, pour se rendre dans un petit réservoir placé au milieu, dans lequel plonge le tuyau d'ascension *d*.

Malgré l'emploi simultané de deux pompes foulantes aboutissant à un même tuyau d'ascension, la vitesse de l'eau serait encore loin d'être régulière à sa sortie de ce tuyau, si l'on n'avait pas recours à un autre moyen ; le mouvement de l'eau se ralentirait d'une manière très marquée, chaque fois que les pistons devraient changer le sens de leur mouvement. Ce moyen de régulariser la vitesse de l'eau consiste dans l'emploi d'un réservoir d'air *e*, placé au-dessus de la capacité où se rend l'eau qui vient des corps de pompe. L'air contenu dans ce réservoir est complétement renfermé ; il se met en équilibre de pression avec l'eau qu'il surmonte, et sa force élasti-

est d'autant plus grande que le mouvement de l'eau dans le d'ascension exige une pression plus considérable à l'origine ce tuyau *d*. Si, à certains moments, l'eau afflue par une des papes *c*, *c*, avec une grande abondance, elle n'a pas besoin de

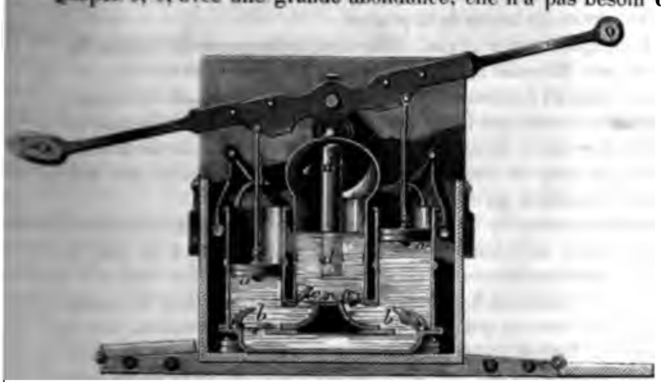


Fig. 416.

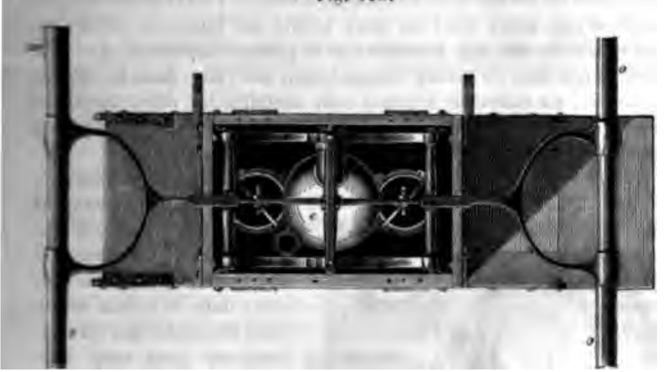


Fig. 417.

passer immédiatement dans le tuyau *d*; elle s'accumule dans le réservoir où plonge ce tuyau, en comprimant l'air qui le surmonte : puis, lorsqu'il arrive moins d'eau par les soupapes, cet air, en réagissant sur l'eau, la pousse peu à peu dans le tuyau d'ascension. A l'aide de cette disposition, les irrégularités que présente la quantité d'*eau foulée à chaque instant* à travers les soupapes c, c, se font

principalement sentir dans le réservoir où aboutissent ces soupapes, et s'y traduisent par des oscillations de la surface de l'eau, qui monte et descend alternativement ; mais il n'en résulte que des variations très peu sensibles dans la vitesse avec laquelle l'eau jaillit à l'extrémité du tuyau de la pompe.

Pour que l'eau n'ait pas, dans toute la longueur du tuyau, la vitesse avec laquelle elle doit s'en échapper à son extrémité, ce qui occasionnerait des frottements considérables, on a soin de donner au tuyau des dimensions transversales beaucoup plus grandes que celles de l'orifice qui le termine. De cette manière l'eau marche assez lentement le long du tuyau, et ce n'est qu'au moment où elle est sur le point de sortir qu'elle prend une grande vitesse.

Pour manœuvrer la pompe, on agit aux deux extrémités d'un grand levier ou balancier, qui peut osciller autour d'un axe horizontal placé au-dessus du réservoir d'air *e*, *fig.* 416 et 417. Ce balancier est traversé à chaque extrémité par un long morceau de bois *o*, qui sert de poignée. Plusieurs hommes saisissent ces poignées, les font alternativement monter et descendre, et ce mouvement d'oscillation est transmis aux pistons *a*, *a*, par l'intermédiaire de tringles de fer qui sont articulées, d'une part à la tige de chaque piston, d'une autre part en deux points du balancier situés de chaque côté de son axe. Pendant que la pompe fonctionne, d'autres hommes ont soin de verser constamment de l'eau dans la caisse, ou bâche, au milieu de laquelle sont installés les deux corps de pompe ; c'est de cette bâche que l'eau s'introduit par les soupapes *b*, *b*, pour être ensuite refoulée dans le tuyau d'ascension.

§ 360. **Pompe à rotation.** — On a cherché à remplacer le mouvement de va-et-vient qu'il faut donner au piston d'une pompe, par un mouvement de rotation s'effectuant toujours dans le même sens : voici la disposition qu'on a imaginée pour cela. Une pièce annulaire AA, *fig.* 418, reçoit un mouvement de rotation autour d'un axe qui correspond à son centre ; elle tourne ainsi dans un espace également annulaire BB. Cet anneau AA présente quatre échancrures, qui sont traversées librement par autant

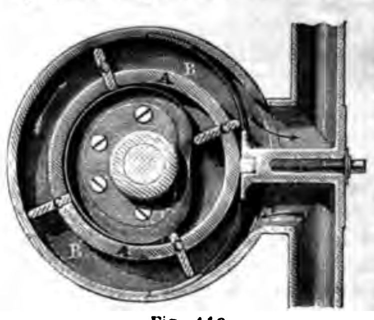
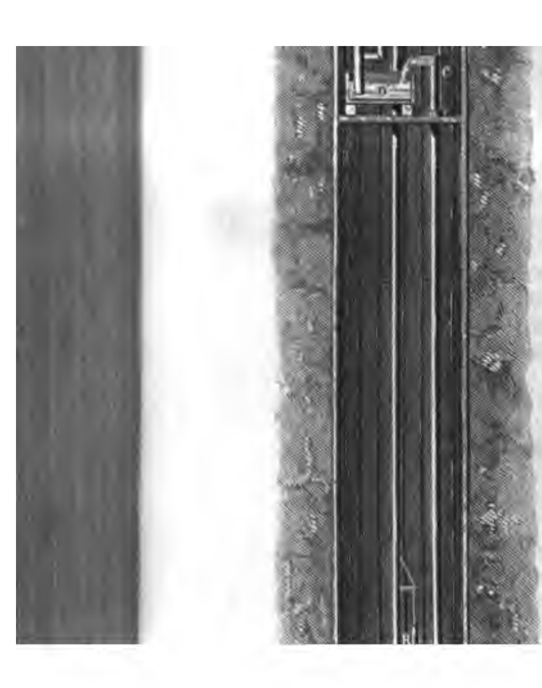


Fig. 418.

s C, C, destinées à diviser l'espace BB en compartiments qui entre eux aucune communication. Les contours extérieur et r de l'espace BB, dans lequel se meuvent l'anneau AA et les C, C, qu'il entraîne avec lui, ne sont pas des circonférences de ces deux contours, qui sont partout à égale distance l'un de , se rapprochent du centre de l'anneau AA, dans la partie qui roite, de telle sorte que le contour extérieur s'y trouve en con-vec la surface de cet anneau. Cette forme de l'espace BB oblige ces C, C, à glisser dans les échancrures de l'anneau AA, de re à se rapprocher et à s'éloigner alternativement de l'axe de on. Il en résulte que les compartiments qui existent tout au-de l'anneau AA, et qui sont séparés les uns des autres par ièces C, C, n'ont pas toujours la même capacité: ces compar-nts augmentent de grandeur, quand les pièces C, C, qui les ter-nt, s'éloignent du centre du mouvement, et diminuent au con-e de grandeur, quand ces pièces C, C, se rapprochent de ce re. Deux ouvertures sont pratiquées dans le contour extérieur 'espace BB, et correspondent, l'une à un tuyau d'aspiration, tre à un tuyau d'ascension. Lorsque, pendant la rotation de neau AA, l'un des compartiments qui l'entourent vient à aug-nter de grandeur, ce compartiment communique avec le tuyau spiration par la première de ces deux ouvertures: il aspire u contenue dans ce tuyau, et se trouve ainsi complétement npli de liquide au moment où il a atteint sa plus grande capa-é. Lorsqu'ensuite ce compartiment vient à se rétrécir, il se uve en rapport avec le tuyau d'ascension, par la seconde ouver-e; l'eau qu'il contient est donc obligée de se rendre dans ce yau, à mesure que la capacité de ce compartiment devient plus tite. On voit, par là, que la pompe dont il s'agit est à la fois pirante et foulante; et que, de plus, elle remplit l'objet d'une mpe à double effet, car le mouvement qu'elle donne à l'eau dans tuyau d'aspiration et dans le tuyau d'ascension est évidemment ntinu.

§ 361. **Pompes de mines.**—L'épuisement des eaux des mines se it, le plus habituellement, au moyen de pompes que l'on installe ns un puits aboutissant au point des galeries souterraines où se ndent les eaux à extraire. Les puits de ce genre ont souvent une ande profondeur: aussi est-on obligé de donner une disposition éciale aux pompes qui doivent y fonctionner.

D'après ce que nous avons dit précédemment (§ 355), une pompe ulante *pourrait bien faire* monter l'eau dans un tuyau d'ascension *i s'élèverait dans toute* la hauteur du puits; mais cela suppo



parois du corps de po
poser aux filtrations
autour de ce piston,
produire sous la pres
terminée par la colon
lever. La présence
trations pourrait fa
vement du piston
moindre quantité d'e
d'ascension ; mais, l
aurait de l'eau élev
terait pas moins un
nient, en ce que la
l'emploi de la même
vail que si elle fonc
qu'une portion nota
serait perdue. C'est
que l'on n'élève pa
jet, dans toute la h
au moyen d'une por
cée vers le bas.

La disposition
consiste à diviser

[redacted]

face du sol, dans le voisinage du puits, et elle fait ainsi fonc- en même temps toutes les pompes qui sont installées dans la hauteur du puits. Le piston B, dans son mouvement de va- it, augmente et diminue alternativement la capacité d'un corps pe qui communique par un tuyau horizontal avec le bas du CC. Deux soupapes existent dans ce tuyau CC, l'une au- l'autre au-dessus de sa communication avec le corps de et s'ouvrent toutes deux de bas en haut. Lorsque le piston e, la soupape supérieure se ferme, l'autre s'ouvre, et l'eau che D monte par aspiration dans le corps de pompe; lors- ite le piston B redescend, la soupape inférieure se ferme, pe supérieure s'ouvre, et l'eau est refoulée dans le tuyau sion CC. Cette eau se rend dans une bâche D′, où elle est par le piston B′, et refoulée de la même manière dans un ′; et ainsi de suite, jusqu'à ce qu'elle arrive au haut du puits, s'écoule au dehors.

!. **Pompes de Marly.** — La fameuse machine de Marly, te sous Louis XIV (de 1675 à 1682), avait pour objet d'éle- u de la Seine au haut d'un aqueduc, d'où elle se rendait dans ins destinés à alimenter le château et le parc de Marly. Plus tte eau fut conduite jusqu'à Versailles, pour l'usage du châ- de la ville. La hauteur totale à laquelle l'eau devait être par cette machine était de 155 mètres; aussi ne chercha- s à la faire monter, d'un seul jet, de la Seine au haut de ıc. On établit deux réservoirs intermédiaires, dont l'un était rs le milieu de la hauteur du coteau qui s'élève aux bords de e, et l'autre vers le haut de ce coteau, à une certaine du pied de l'aqueduc. Trois systèmes de pompes furent s, l'un au bord de la Seine, les deux autres à côté des deux irs intermédiaires dont nous venons de parler. Le premier e de pompes élevait l'eau de la Seine dans le réservoir placé eu du coteau; le second reprenait cette eau pour l'élever dans voir situé vers le bas de l'aqueduc; et le troisième la faisait de ce deuxième réservoir jusqu'au haut de l'aqueduc. Qua- oues hydrauliques (le nombre de ces roues avait été déter- lit-on, de manière à rappeler le nom de Louis XIV) étaient dans la Seine, et y étaient mises en mouvement par la chute u'on y avait créée, en construisant un barrage et des digues s, de manière à élever le niveau de l'eau en amont. Ces qua- ues, dont chacune avait 12 mètres de diamètre, faisaient r les trois systèmes de pompes. A cet effet, le mouvement ansmis aux pompes placées près des réservoirs intermédiai-

res, par un grand nombre de longues chaînes formées de l
fer articulées les unes au bout des autres, qui s'étendaie
flanc du coteau, moitié jusqu'au premier réservoir, et l'aut
jusqu'au second, c'est-à-dire jusqu'au sommet du coteau
vement de va-et-vient, que des manivelles adaptées aux a
roues hydrauliques communiquaient à ces chaînes, donn
un mouvement correspondant des divers pistons, et l'eau
vée par étages, comme dans les puits de mines, depuis
jusqu'au haut de l'aqueduc.

Dans cette machine immense, la plus grande partie
moteur développé par la chute d'eau, et appliqué aux
drauliques, était absorbée par les résistances passives;
tances n'ont fait que
avec le temps, et elle
ne produire qu'une
quantité de travail uti
maintenant remplacé
pompes auxquelles or
nu à faire élever l'ea
jet, depuis le bord de
qu'au sommet de l'a
construction de ces
pompes, qui remonte
premières années de
fourni le premier exe
lévation de l'eau, d'
à une aussi grande ha
quelle en est la dispo

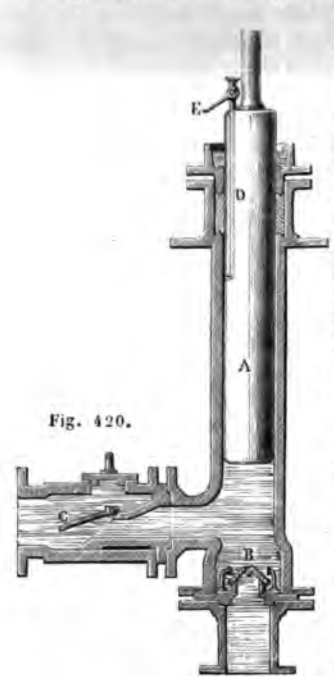


Fig. 420.

Un piston métall
420, a la forme d'un c
la hauteur est bea
grande que le diamèt
se meut dans un corp
dont il ne touche pas l
ne frotte que sur un
d'étoupes qui est adap
tie supérieure du co
pe Deux soupapes
établissent et interce
nativement la comm
corps de pompe avec le tuyau d'aspiration ; une autre s
fait de même communiquer avec le tuyau d'ascension. L

vient du piston donne lieu à des augmentations et à des
ns alternatives de la capacité du corps de pompe, tout
n que si le piston était garni d'étoupes sur son contour, et
ontre les parois intérieures du corps de pompe. Lorsqu'il
il y a aspiration de l'eau par les soupapes B; lorsqu'il s'a-
nsuite, cette eau est refoulée par la soupape C. La garniture
es, qui est ici adaptée au haut du corps de pompe, peut
s facilement entretenue en bon état, que si elle était portée
piston et mobile avec lui; mais cette disposition seule, en
de laquelle ce système de pompe prend le nom de *pompes
n plongeur*, n'aurait pas suffi pour que l'eau pût être refoulée
à une hauteur verticale de 155 mètres.

l'on examine ce qui se passe pendant que la pompe fonctionne,
oit que la pression, dans le corps de pompe, doit être infé-
re à la pression atmosphérique, lorsque l'aspiration se produit;
qu'au contraire elle doit lui être de beaucoup supérieure, lors-
 l'eau est refoulée dans le tuyau d'ascension. Dans le premier
, l'eau, qui contient toujours une petite quantité d'air en disso-
ion, doit laisser dégager une partie de cet air: d'ailleurs elle peut
ssi amener avec elle de petites quantités d'air qui se trouvent
traînées mécaniquement, sans être dissoutes; enfin il peut arriver
e l'air atmosphérique s'infiltre, soit par quelques fissures, soit en
ssant entre le piston et la garniture d'étoupes. On voit donc que
aque aspiration peut amener de l'air dans le corps de pompe; cet
 se loge dans l'espace annulaire très étroit qui existe entre le
ston et le corps de pompe, et aussi au-dessous du piston. Lors-
e le piston s'abaisse, l'air contenu dans le corps de pompe com-
nce par se comprimer, et ce n'est que lorsque son volume s'est
ez diminué, pour que sa force élastique soit en rapport avec la
ssion que produit la colonne d'eau du tuyau d'ascension, que
u commence à être refoulée à travers la soupape C. On conçoit
 là que, si l'eau doit être élevée à une très grande hauteur, il
t arriver que le piston ne refoule aucune quantité d'eau dans le
au d'ascension. Ou bien encore, si la pompe commence à fonction-
, elle fera d'abord monter de plus en plus le niveau de l'eau dans
tuyau d'ascension: mais il pourra se faire que ce niveau ne
lève pas au delà d'une certaine limite, située plus bas que le
nt où l'on veut amener l'eau. Lors même que l'eau pourrait être
ulée jusqu'à l'extrémité supérieure du tuyau d'ascension, la pré-
ce de l'air dans le corps de pompe serait encore très nuisible
ce que la quantité d'eau élevée à chaque coup de piston en serai
s *notablement diminuée*. Pour se mettre à l'abri de ces grav

inconvénients, on a pratiqué dans le corps du piston un petit c
duit D, fermé à sa partie supérieure par un robinet, que l'on
ouvrir au moyen d'une clef E. De temps en temps on ouvr
robinet, au moment où le piston descend, et l'air qui se tr
comprimé tout autour du piston s'échappe par le conduit D.

Deux des quatorze roues de l'ancienne machine de Marly
tent encore. Chacune d'elles fait mouvoir quatre pompes telle
celle qui vient d'être décrite. Le mouvement est transmis de la
à ces quatre pompes de manière que le refoulement de l'eau
le tuyau d'ascension unique, auquel elles correspondent, soit
régulier que possible. Lorsque l'un des quatre pistons est au
de sa course, un second est au bas de la sienne, un troisième
milieu de sa course ascendante, et le quatrième au milieu
course descendante. Outre les huit pompes mues par les deux
hydrauliques, il y en a huit autres qui reçoivent leur mouv
d'une machine à vapeur, établie en 1826, avec un grand lu
construction.

La colonne d'eau contenue dans les tuyaux d'ascension de
pes de Marly produirait, à l'état d'équilibre, une pression
atmosphères. L'expérience a prouvé que la pression que les p
ont à vaincre s'élève environ à 17 atmosphères : les résistanc
résultent du mouvement de l'eau dans les tuyaux déterminen
une augmentation de 2 atmosphères dans cette pression.

§ 363. **Pouce d'eau.** — Pour évaluer la quantité d'eau que l
une pompe, on se sert d'une unité particulière, qui porte le
de *pouce d'eau*. Imaginons qu'on ait pratiqué, dans la paroi ve
d'un réservoir, une ouverture
laire d'un pouce de diamètre (le
ancienne mesure française, va
millimètres); et que le niveau de
dans le réservoir, soit entretenu
ligne au-dessus de la partie supé
de cet orifice (la ligne est la dou
partie du pouce). C'est ce que r
sente la *fig.* 421, qui a été con
à l'échelle de $0^m,5$ pour mètre.
pompe fournit, dans un temps c
la quantité d'eau qui s'écoulerait
le même temps par un, deux, tro
orifices de ce genre, placés da
conditions indiquées, on dit qu'elle donne un, deux, troi
pouces d'eau. Le pouce d'eau ne représente pas un

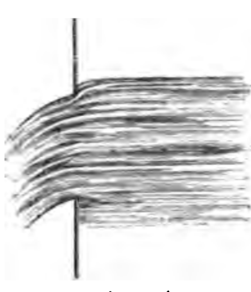


Fig. 421.

déterminé de liquide, et c'est pour cela qu'il peut servir de mesure à la puissance d'une pompe, sans qu'on ait besoin d'indiquer le temps pendant lequel on suppose qu'elle fonctionne. Si, au contraire, on voulait faire connaître la puissance d'une pompe, en indiquant le volume de l'eau qu'elle fournit, volume qui pourrait être évalué, soit en mètres cubes, soit en litres, on aurait besoin de dire, en outre, pendant combien de temps la pompe doit fonctionner pour fournir ce volume d'eau. L'expérience a montré que le volume de l'eau qui s'écoule en 24 heures, par un orifice circulaire d'un pouce de diamètre, percé en mince paroi, sous une charge d'une ligne au-dessus de la partie supérieure de cet orifice, est d'environ $19^{mc},2$. On voit, d'après cela, que quand on dit qu'une pompe donne un, deux, trois,.... pouces d'eau, cela signifie qu'elle fournirait en 24 heures une fois, deux fois, trois fois,.... $19^{mc},2$ d'eau.

Prony a indiqué une autre disposition, un peu plus commode que la précédente, pour l'orifice à l'aide duquel on peut évaluer le produit d'une pompe. C'est un orifice circulaire de 2 centimètres de diamètre, muni d'un ajutage cylindrique de 17 millimètres de longueur ; le niveau de l'eau dans le réservoir doit être maintenu à une distance de 3 centimètres au-dessus de la partie supérieure de l'orifice. La *fig.* 422, qui représente cette disposition, a été construite à l'échelle de $0^{m},5$ pour mètre. On y voit un repère *a*, fixé à la paroi, et destiné à marquer la position que doit avoir le niveau de l'eau dans le réservoir. La quantité d'eau qui s'écoule en 24 heures, par cet orifice de Prony, est un peu plus grande que celle qui s'écoule par l'orifice de la *fig.* 421 ; elle s'élève à 20 mètres cubes. On a conservé le nom de pouce d'eau au produit de cet orifice de Prony ; en sorte que le pouce d'eau actuel est un peu plus grand que l'ancien pouce d'eau des fonteniers.

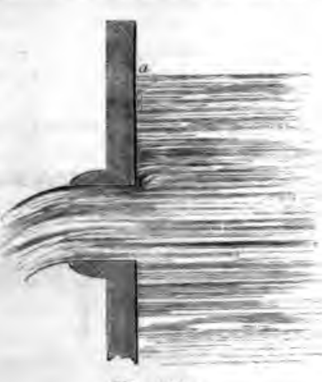


Fig. 422.

§ 364. **Cuvettes de jauge et de distribution.** — Il nous reste maintenant à dire par quel moyen on trouve le nombre de pouces d'eau que fournit une pompe. Pour cela il nous suffira de décrire

la cuvette de jauge qui est établie au haut de l'aqueduc de Marly, et qui est destinée à évaluer le produit des diverses pompes qui élèvent les eaux de la Seine jusque sur cet aqueduc.

La *fig.* 423 représente le plan de cette cuvette de jauge; la *fig.* 424 en est une coupe faite suivant la ligne GG′ du plan. L'eau

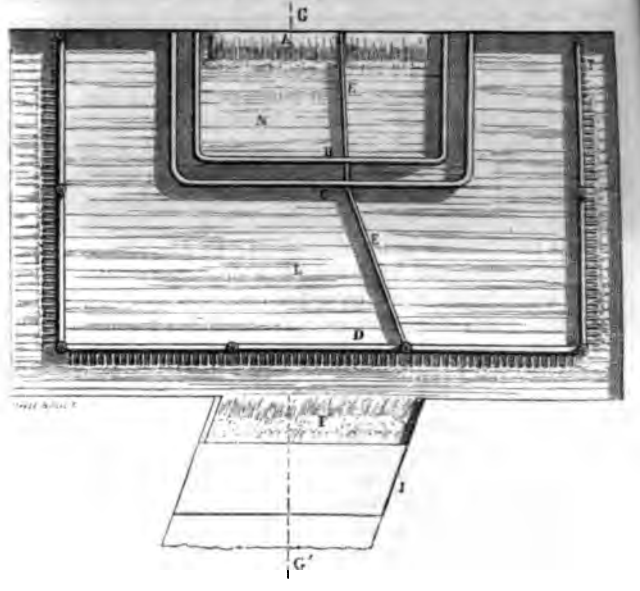


Fig. 423. (*Échelle de 20 millimètres pour mètre.*)

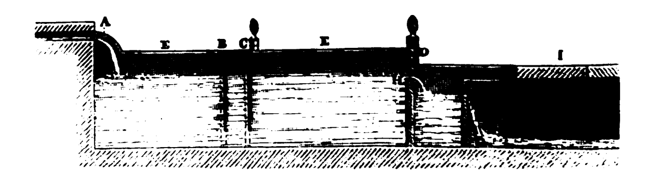


Fig. 424.

élevée par les pompes arrive en A, où elle tombe sous forme de nappe, dans un réservoir rectangulaire. Deux cloisons B, C, entre-

ront la partie N de ce réservoir, sans descendre jusqu'au fond, fig. 424, afin d'empêcher que les mouvements occasionnés sur la surface, par l'eau qui arrive en A, ne se transmettent dans la partie restante L; l'eau se rend de N en L, en passant sous ces deux cloisons, et sa surface libre, dans toute l'étendue de cette dernière partie L du réservoir, est ainsi rendue parfaitement tranquille. La cloison D, qui sert de limite au réservoir, et qui s'étend dans trois directions différentes, porte, dans toute sa longueur, un grand nombre d'orifices H disposés comme celui de la *fig*. 422; l'eau sort du réservoir par ces divers orifices, et tombe dans une rigole qui existe en dehors de la cloison D, et dans toute sa longueur: de là elle tombe, en F, dans un canal couvert qui la conduit à l'autre extrémité de l'aqueduc. Une cloison EE divise le réservoir LN en deux parties entièrement distinctes; celle de droite reçoit les eaux qui viennent des pompes mues par les roues hydrauliques; celle de gauche reçoit les eaux fournies par les pompes de la machine à vapeur (§ 362). Par cette disposition, les eaux qui viennent de ces deux systèmes de pompes ne se réunissent qu'après avoir traversé les orifices de la cloison D, c'est-à-dire après avoir été jaugées, ainsi que nous allons l'expliquer.

Si l'on suppose que l'eau sorte du réservoir LN, en passant toujours par le même nombre de trous de la cloison D, on conçoit que le niveau qu'elle prendra dans le réservoir sera plus ou moins élevé au-dessus de ces trous, suivant que les pompes fourniront plus ou moins d'eau dans un même temps. En effet ce niveau s'établit de manière à donner au liquide une vitesse d'écoulement, par les orifices, qui soit telle que la quantité d'eau qui les traverse, dans un temps donné, soit précisément égale à celle que les pompes amènent dans le même temps. Si, au contraire, on ferme un certain nombre des orifices de la cloison D, à l'aide de bouchons de liége, comme on le voit en T, *fig*. 423, on fera monter en conséquence le niveau de l'eau dans le réservoir LN, pour une même quantité d'eau fournie par les pompes; car, à mesure qu'on diminuera le nombre des orifices d'écoulement, la vitesse avec laquelle l'eau traversera chacun d'eux devra s'accroître, pour qu'il en sorte toujours la même quantité. On peut donc faire varier à volonté la position du niveau de l'eau dans le réservoir LN, en fermant un nombre plus ou moins grand des orifices; et l'on en profite pour faire en sorte que ce niveau coïncide avec un repère fixé à la cloison D, repère que nous avons déjà indiqué précédemment en *a*, *fig*. 422. Lorsque cette coïncidence du niveau de l'eau avec le repère est établie d'une manière permanente depuis quelque temps, il suffit de compter les

trous qui restent ouverts, pour avoir immédiatement le nombre de pouces d'eau que fournissent les pompes.

Dans la cuvette de jauge de l'aqueduc de Marly, la partie du réservoir qui sert à jauger les eaux amenées par les roues hydrauliques est munie de 60 orifices; la partie qui correspond aux eaux fournies par la machine à vapeur, en contient 90. Si l'on trouvait, par exemple, que les pompes mues par les roues hydrauliques élèvent 60 pouces d'eau sur l'aqueduc, ce qui doit avoir lieu lorsqu'elles fonctionnent bien, cela voudrait dire qu'elles y élèvent 60 fois 20 mètres cubes, ou 1200 mètres cubes d'eau, en 24 heures. On calculera sans difficulté le nombre de chevaux-vapeur qui correspond à ce travail utile, en observant que la hauteur à laquelle l'eau est élevée est de 155^{m}. En effet, le travail utile, produit en 24 heures, sera égal à 186 000 000^{km}; en une seconde, il sera 2153^{km}; donc il correspond à une force de 28,7 chevaux-vapeur. La force réunie des deux roues hydrauliques, qui font marcher les pompes à Marly, doit représenter un plus grand nombre de chevaux-vapeur, en raison des pertes de travail de toutes sortes qui existent dans de semblables machines, et qu'il est impossible de faire disparaître complétement.

La distribution des eaux entre les divers quartiers d'une ville, et même entre les divers particuliers qui ont des concessions d'eau, se fait à l'aide de cuvettes entièrement analogues aux cuvettes de jauge. Toute la masse d'eau à distribuer se rend dans un réservoir, d'où elle sort par des orifices pratiqués sur tout son contour, et l'on dispose les tuyaux ou conduits entre lesquels doit se fractionner cette masse d'eau, de manière que chacun d'eux reçoive l'eau qui s'écoule par un nombre déterminé des orifices.

§ 365. **Divers systèmes de lampes.** — On a imaginé un grand nombre de dispositions différentes pour les appareils d'éclairage auxquels on donne le nom de *lampes*. Nous allons faire connaître les principales; on y verra une application d'un assez grand nombre des principes que nous avons étudiés jusqu'à présent.

Dans les lampes, la lumière est produite par la combustion de l'huile. Pour opérer cette combustion, on emploie une mèche de coton, que l'on fait plonger en grande partie dans l'huile; la portion de la mèche qui sort du liquide s'en imbibe complétement par un effet de capillarité, et c'est à cette portion que l'on met le feu. A mesure que l'huile se brûle, la capillarité en fait monter de nouvelles quantités, et la mèche ne se charbonne que dans une très petite étendue. Pour activer la combustion, et obtenir une lumière plus vive, on donne à la mèche la forme d'un cylindre creux, et on

[redacted]

it dans l'espace annulaire compris entre deux tuyaux con-
es de fer-blanc; l'huile est amenée dans ce même espace
e, et s'y élève jusqu'à la partie supérieure de ces deux
la mèche, qui plonge ainsi dans l'huile, monte un peu plus
lorsqu'on y met le feu, elle brûle sur tout le contour de son
érieur. On dispose en outre, autour du *bec* de la lampe, un
verre qui s'élève à deux ou trois décimètres au-dessus du
se fait la combustion; ce tuyau fait fonction de cheminée
et, en raison de la température élevée qui s'y développe,
duit à son intérieur un courant ascendant très rapide qui
onstamment de l'air sur la flamme, tant par l'intérieur du
est creux, que par tout son contour. Ordinairement la che-
e verre que l'on adapte à un bec de lampe se rétrécit brus-
; à une faible distance de sa base; ce rétrécissement est
à changer la direction des divers filets gazeux, qui sans cela
raient verticalement, et à les projeter sur le contour exté-
la flamme.
sposition qui vient d'être indiquée est adoptée dans toutes
es qui sont destinées à produire une lumière un peu vive.
rence entre les diverses espèces de lampes consiste essen-
nt dans le moyen employé pour amener l'huile jusqu'à la
upérieure du bec; la variété des procédés imaginés pour y
tient à la difficulté qu'on a rencontrée pour remplir cet
une manière convenable. Il faut, en effet, satisfaire aux
ons suivantes: 1° entretenir constamment l'huile dans le bec,
au de son extrémité supérieure; 2° éviter que l'huile, en
ant tout autour du bec, ne puisse se répandre au dehors et
objets qu'elle atteindrait: 3° faire en sorte que la lumière
se répandre dans toutes les directions possibles autour du
éviter en conséquence les dispositions dans lesquelles cer-
parties de la lampe pourraient intercepter la lumière, et
r de l'ombre sur les corps environnants. Nous allons voir
nt on est parvenu à satisfaire plus ou moins complétement à
erses conditions.
6. La *fig.* 425 représente une lampe dans laquelle le niveau
ile s'établit dans le bec, en vertu du principe de l'équilibre
uides dans des vases communiquants (§ 228). L'huile est con-
lans un réservoir *aa*, en forme de couronne; deux conduits
s *b*, *b*, l'amènent à la partie inférieure du bec, qui est dis-
e manière à occuper le centre du réservoir. On voit en *c* une
ure, *habituellement* fermée par un bouchon, qui sert à l'in-
ion de l'huile dans le réservoir. Un petit cône *d*, présentant

un trou à son sommet, permet à l'air atmosphérique d'exercer librement sa pression sur le liquide. D'après cette disposition, le niveau de l'huile dans le bec est toujours à la même hauteur que dans le réservoir *aa* ; il baisse donc de plus en plus, à mesure que l'huile se brûle. C'est pour cela qu'on a donné au réservoir de très petites dimensions dans le sens vertical, et qu'on l'a surtout étendu dans le sens horizontal. Il en résulte que le niveau ne varie réellement pas d'une grande quantité dans le bec. Lorsque le réservoir est plein, le liquide doit monter jusqu'à la partie supérieure du bec ; il baisse à mesure que le réservoir se vide ; mais le contact du métal empêche que la flamme descende en même temps le long de la mèche, et par suite l'intensité de la lumière produite doit diminuer progressivement.



Fig. 425.

Un godet est adapté à la partie inférieure du bec, pour recevoir les petites quantités d'huile qui peuvent s'écouler au dehors. Plusieurs trous sont pratiqués au haut de ce godet, sur tout son contour, pour que l'air puisse s'introduire à l'intérieur, de manière à monter dans le bec, et à venir passer au milieu de la flamme. La forme du réservoir *aa*, et sa position par rapport au bec, font qu'il n'empêche nullement la lumière de se répandre librement sur les objets qui sont placés au-dessous du niveau de la lampe. Les conduits *b*, *b*, peuvent seuls gêner sous ce rapport : mais ils sont très étroits, et il n'en résulte pas d'inconvénient. Cette espèce de lampe, quant à sa disposition, convient donc très bien pour éclairer des tables de travail, et en général dans tous les cas où l'on a besoin de répandre la lumière sur les objets placés dans la partie inférieure d'une chambre : mais elle a le désavantage de ne pas fournir une lumière d'une intensité constante.

§ 367. On a cherché à faire disparaître l'inconvénient qui résulte

ent progressif du niveau de l'huile dans le bec, en
noyen indiqué précédemment (§ 258), pour rendre ce
t. La *fig.* 426 représente une lampe construite d'après
i vase *a*, qui a
i flacon à une
placé à l'inté-
tre vase *b*, cy-
ne le premier,
ır le haut. Le
ıversé, c'est-à-
ouverture est
bas; il s'appuie
ı moyen d'un
t il est muni,
ntour du bord
'ase *b*. L'huile,
oduite primiti-
ne peut pas en
nt, parce que
ıu-dessus de sa
ıe communique
nosphère : elle
ler dans le ré-
ıtant que le ni-
ez abaissé dans
pour permettre
ıir d'entrer par
vase *a*. On voit
nanière, on ob-
au constant de
rieur du réser-
etite ouverture



Fig. 426.

iquée dans la paroi de ce réservoir, permet d'ailleurs
ıir d'y entrer librement; en sorte que la surface
est soumise à la pression atmosphérique. Un tuyau
ile du réservoir *b* au bec, dont l'extrémité se trouve
rizontal *ee'* passant par les bords de la tubulure du

uire de l'huile dans le vase *a*, on le retire de l'inté-
voir *b*, et on le retourne afin de placer la tubulure
n l'emplit alors d'huile, puis on le renverse de nou-
replacer comme il était. Un petit disque métallique,

faisant fonction de soupape, vient s'appliquer contre l'ouverture intérieure de la tubulure, pour empêcher l'huile de sortir, soit lorsqu'on enlève le vase *a* pour le remplir, soit lorsqu'on le remet en place après l'avoir empli. Cette soupape est munie d'une tige un peu longue, qui vient s'appuyer sur le fond du réservoir *b*, lorsque le vase *a* y est introduit, de manière à maintenir la tubulure constamment ouverte, et à permettre à l'huile de descendre librement en *b*, chaque fois que le niveau s'est suffisamment abaissé. La lampe est montée sur une tige, le long de laquelle on peut la faire glisser, pour la fixer à telle hauteur que l'on veut; la tige surmonte un large pied, à l'aide duquel on peut poser la lampe sur une table.

Cette lampe satisfait bien à la condition d'entretenir l'huile constamment à la même hauteur dans le bec, et par conséquent de donner une lumière d'une grande régularité; mais elle présente des inconvénients. Le premier consiste en ce que le réservoir d'huile, placé d'un côté du bec, projette son ombre sur les objets situés de ce côté. Le second tient à ce que, la lampe étant portative, l'horizontalité de la ligne *ee'* n'est pas toujours maintenue; pour peu que la lampe penche du côté du bec, soit qu'on la transporte, soit qu'elle repose sur une surface légèrement inclinée, l'huile déborde au haut du bec, vient remplir le godet qui est placé au-dessous, et finit par se répandre au dehors.

§ 368. La disposition la plus avantageuse qn'on puisse donner à une lampe est évidemment celle dans laquelle le bec serait placé verticalement au-dessus du réservoir, et à telle hauteur qu'on voudrait. En effet, on éviterait par là d'avoir latéralement des corps qui s'opposent à ce que la lumière se répande dans toutes les directions; et d'un autre côté, l'huile qui déborderait tout autour du bec pourrait retomber dans le réservoir, ou bien encore dans une capacité spéciale assez grande pour qu'il n'y ait pas à craindre qu'elle ne se répande au dehors. Toute la difficulté que l'on rencontrera pour réaliser cette disposition, consistera à faire monter l'huile du réservoir jusqu'au haut du bec, et surtout à l'y faire monter d'une manière régulière. Nous allons voir quels sont les moyens qui ont été imaginés pour y arriver.

La fontaine de Héron, dont nous avons parlé précédemment (§ 297), paraît éminemment propre à atteindre le but que nous nous proposons en ce moment; on voit, en effet, qu'elle permettrait de faire monter de l'huile dans un bec qui serait isolé au-dessus du corps de la lampe. Mais si l'on examine attentivement cet appareil on verra qu'il serait loin de satisfaire aux conditions que doit remplir une bonne lampe. Pour nous en rendre compte, admettons

pe soit disposée comme le tube ABC de la *fig*. 377 (page
ue le bec, dans lequel l'huile du réservoir C sera poussée
nne d'huile AB, soit assez élevé pour que le liquide s'y
équilibre, sans s'écouler par son extrémité supérieure. A
ue l'huile brûlera vers le haut du bec, les surfaces libres
s A, B, C, se déplaceront; le niveau baissera en A et en
ntera au contraire en B. Pour que l'huile se maintînt tou-
a même hauteur dans le bec, il faudrait que la force élasti-
'air contenu de B en C augmentât, puisque la différence de
le l'extrémité supérieure du bec et de la surface du liquide
gmente constamment. Or, cela ne peut pas avoir lieu, puis-
tte force élastique de l'air est déterminée par la pression
colonne d'huile ayant pour hauteur la
nce de niveau en A et en B, et que cette
nce de niveau va en diminuant. On
lonc que la hauteur à laquelle l'huile
era dans le bec sera de plus en plus
e, à mesure qu'il s'en brûlera une plus
de quantité, et que, par suite, la quan-
de lumière qu'elle fournira sera loin
re régulière.

lais, si la fontaine de Héron, telle que
s l'avons décrite, ne peut pas atteindre
ut que l'on se propose, il suffit de lui
e subir quelques modifications, pour
lle puisse faire monter l'huile toujours
a même hauteur dans un bec de lampe.
t ce que montre la *fig*. 427. Trois com-
iments A, B, C, sont fermés de toutes
s, et ne peuvent communiquer, soit en-
eux, soit avec l'atmosphère, que par les
rs tubes D, E, F, G. Supposons que
ait primitivement introduit de l'huile
A et en B, par un moyen quelconque.
pression atmosphérique s'exerce libre-
t sur l'huile de la capacité B par le tube
cette huile descend par le tube E, dans
apacité C; l'air situé en C, au-dessus
'huile, se trouve comprimé, et vient,
passant par le tube FF, exercer une
sion sur l'huile du réservoir A; enfin cette huile, en raison de
a *pression qu'elle supporte*, s'élève dans le tube G, qui com

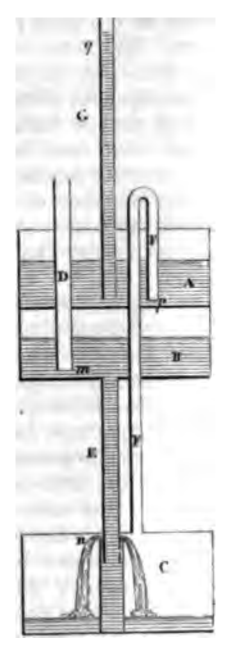


Fig. 427.

munique librement avec l'atmosphère par sa partie supérieure ; si le tube G se termine par un bec de lampe, et que l'huile qui y arrive se brûle peu à peu, on voit que le niveau du liquide baissera en A et en B, et montera en même temps en C; il semble donc que, la différence de niveau en B et en C diminuant, la force élastique de l'air intérieur doit diminuer, et qu'en conséquence, comme dans l'appareil de la *fig.* 377, le liquide doit monter de moins en moins haut dans le tube G. Mais il faut observer que ce n'est pas sur la surface libre de l'huile en B que s'exerce la pression atmosphérique ; cette pression s'exerce à l'extrémité inférieure du tube D. De même, en raison de ce que le tube E plonge dans un tube plus large placé au milieu du réservoir C, et que ce tube large est toujours plein d'huile jusqu'en *n*, la position du niveau de l'huile en C n'influe pas sur la force élastique de l'air qui le surmonte. Cette force élastique doit évidemment surpasser celle de l'air atmosphérique d'une quantité déterminée par la différence de niveau des deux points *m* et *n* ; et en conséquence elle ne varie pas avec la position des surfaces libres de l'huile en B et en C. L'air qui se rend dans le réservoir A par le tube FF y exerce une pression constante : et, comme cette pression s'exerce pas sur la surface de l'huile qui y est contenue, mais bien à l'extrémité inférieure *p* du tube recourbé FF, il en résulte qu'il fait toujours monter l'huile en *q*, à une même hauteur au-dessus du point *p*.

Ces ingénieuses modifications, apportées à la fontaine de Héron pour la rendre applicable à la construction des lampes, ont été imaginées par Girard. Les lampes construites d'après ce procédé ont reçu le nom de *lampes hydrostatiques*. Sous le point de vue théorique, elles satisfont à toutes les conditions que doit remplir une bonne lampe ; mais on les a abandonnées, à cause du peu de commodité qu'elle présentent sous le rapport de l'introduction de l'huile et des nettoyages.

§ 369. Pour faire monter l'huile d'une manière régulière dans un bec placé au-dessus du réservoir, on emploie maintenant exclusivement un moteur installé dans le corps de la lampe, soit au-dessous du réservoir d'huile, soit dans le réservoir lui-même. Les premières lampes de ce genre qui aient été construites sont les *lampes Carcel*, ainsi appelées du nom de leur inventeur. Dans ces lampes, un mécanisme d'horlogerie, mû par un ressort tel que celui des figures 226 et 227 (page 235), et dont le mouvement est régularisé par l'appareil à palettes de la figure 229 (page 23…), fait mouvoir des pompes foulantes qui élèvent l'huile jusqu'à…

périeure du bec. Ces pompes sont d'une espèce particulière. Deux compartiments rectangulaires A, B, *fig*. 428, n'ayant aucune communication l'un avec l'autre, forment, à proprement parler, les corps de pompe. Deux ouvertures circulaires C, D, sont pratiquées sur l'une des faces de ces compartiments, et sont exactement fermées par deux membranes non tendues, qui peuvent en conséquence être repoussées vers l'intérieur de ces compartiments, ou bien tirées au dehors. De petits disques métalliques, attachés à ces membranes, sont munis de tiges CE, DF; un levier EF, qui peut tourner autour d'un axe vertical G, est articulé à ses deux extrémités avec les tiges de ces espèces de pistons; un levier GH, fixé au même axe G, est mis en communication avec une manivelle I, adaptée à l'extrémité d'un arbre horizontal K, auquel le mécanisme d'horlogerie donne un mouvement de rotation uniforme. La manivelle I pousse et tire alternativement le levier GH, par l'intermédiaire de la bielle HI; l'axe G, prenant ainsi un mouvement de rotation alternatif, communique un mouvement de va-et-vient aux deux tiges CE, DF; et les membranes C et D sont alternativement poussées à l'intérieur des compartiments A et B, et retirées au dehors. La capacité de chacun de ces compartiments A, B, augmente donc et diminue alternativement, tout aussi bien que si un piston était animé d'un mouvement de va-et-vient à son intérieur, en frottant contre ces parois. Une soupape permet à l'huile du réservoir de pénétrer dans chacun des corps de pompes lorsque sa capacité augmente; lorsque, au contraire, sa capacité diminue, cette soupape se ferme, et l'huile, ouvrant une autre soupape, est refoulée dans un tuyau d'ascension. Le mouvement ascendant de l'huile est sensiblement régulier, en raison de ce qu'il existe deux pompes qui marchent en sens contraire l'une de l'autre, ce qui fait que l'huile est toujours refoulée, soit par l'une, soit par l'autre, dans le tuyau d'ascension commun auquel elles communiquent.

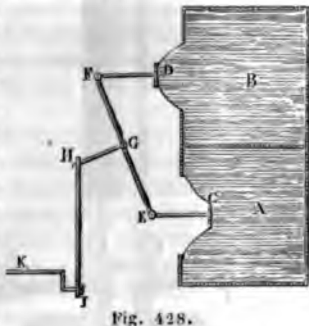


Fig. 428.

Dans les lampes Carcel, les pompes sont disposées de manière à faire monter plus d'huile qu'il n'en faut pour entretenir la combustion; l'excédant retombe dans le réservoir même où puissent les pompes.

munique librement avec l'atmosphère par sa partie supérieure. Si le tube G se termine par un bec de lampe, et que l'huile qui y arrive se brûle peu à peu, on voit que le niveau du liquide baissera en A et en B, et montera en même temps en C; il semble donc que, la différence de niveau en B et en C diminuant, la force élastique de l'air intérieur doit diminuer, et qu'en conséquence, comme dans l'appareil de la *fig.* 377, le liquide doit monter de moins en moins haut dans le tube G. Mais il faut observer que ce n'est pas sur la surface libre de l'huile en B que s'exerce la pression atmosphérique; cette pression s'exerce à l'extrémité inférieure *m* du tube D. De même, en raison de ce que le tube E plonge dans un tube plus large placé au milieu du réservoir C, et que ce tube plus large est toujours plein d'huile jusqu'en *n*, la position du niveau de l'huile en C n'influe pas sur la force élastique de l'air qui la surmonte. Cette force élastique doit évidemment surpasser celle de l'air atmosphérique d'une quantité déterminée par la différence de niveau des deux points *m* et *n*; et en conséquence elle ne varie pas avec la position des surfaces libres de l'huile en B et en C. L'air qui se rend dans le réservoir A par le tube FF y exerce donc une pression constante; et, comme cette pression s'exerce, non pas sur la surface de l'huile qui y est contenue, mais bien à l'extrémité inférieure *p* du tube recourbé FF, il en résulte qu'elle fera toujours monter l'huile en *q*, à une même hauteur au-dessus du point *p*.

Ces ingénieuses modifications, apportées à la fontaine de Héron, pour la rendre applicable à la construction des lampes, ont été imaginées par Girard. Les lampes construites d'après ce procédé ont reçu le nom de *lampes hydrostatiques*. Sous le point de vue théorique, elles satisfont à toutes les conditions que doit remplir une bonne lampe; mais on les a abandonnées, à cause du peu de commodité qu'elle présentent sous le rapport de l'introduction de l'huile et des nettoyages.

§ 369. Pour faire monter l'huile d'une manière régulière dans un bec placé au-dessus du réservoir, on emploie maintenant exclusivement un moteur installé dans le corps de la lampe, soit au-dessous du réservoir d'huile, soit dans le réservoir lui-même. Les premières lampes de ce genre qui aient été construites sont les *lampes Carcel*, ainsi appelées du nom de leur inventeur. Dans ces lampes, un mécanisme d'horlogerie, mû par un ressort tel que ceux des figures 226 et 227 (page 235), et dont le mouvement est régularisé par l'appareil à palettes de la figure 229 (page 238), fait mouvoir des pompes foulantes qui élèvent l'huile jusqu'à la partie

[redacted]

du bec. Ces pompes sont d'une espèce particulière. Deux ents rectangulaires A, B, *fig.* 428, n'ayant aucune commu-
in avec l'autre, forment,
ent parler, les corps de
ux ouvertures circulai-
ont pratiquées sur l'une
de ces compartiments,
actement fermées par
oranes non tendues, qui
a conséquence être ro-
vers l'intérieur de ces
ents, ou bien tirées au
petits disques métalli-
chés à ces membranes,
s de tiges CE, DF; un
, qui peut tourner au-

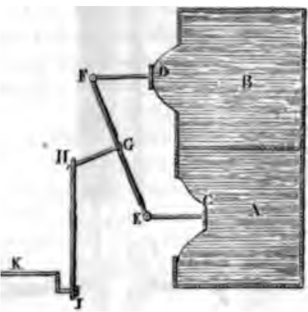


Fig. 428.

axe vertical G, est articulé à ses deux extrémités avec e ces espèces de pistons; un levier GH, fixé au même mis en communication avec une manivelle I, adaptée à d'un arbre horizontal K, auquel le mécanisme d'horlo- ie un mouvement de rotation uniforme. La manivelle I ire alternativement le levier GH, par l'intermédiaire de I; l'axe G, prenant ainsi un mouvement de rotation al- ommunique un mouvement de va-et-vient aux deux tiges et les membranes C et D sont alternativement poussées ir des compartiments A et B, et retirées au dehors. La e chacun de ces compartiments A, B, augmente donc et lternativement, tout aussi bien que si un piston était n mouvement de va-et-vient à son intérieur, en frottant parois. Une soupape permet à l'huile du réservoir de pé- s chacun des corps de pompes lorsque sa capacité aug- rsque, au contraire, sa capacité diminue, cette soupape et l'huile, ouvrant une autre soupape, est refoulée dans l'ascension. Le mouvement ascendant de l'huile est sensi- égulier, en raison de ce qu'il existe deux pompes qui en sens contraire l'une de l'autre, ce qui fait que l'huile s refoulée, soit par l'une, soit par l'autre, dans le tuyau n commun auquel elles communiquent.

s lampes Carcel, les pompes sont disposées de manière à er plus d'huile qu'il n'en faut pour entretenir la combus- édant retombe dans le réservoir même où puissent les



Fig. 420.

§ 370. Depuis quelques années, on se sert beaucoup de lampes dites *à modérateur*. Dans ces lampes, l'huile est relevée jusqu'au bec par l'action d'un ressort moteur, comme dans les lampes Carcel; mais leur prix est beaucoup moins élevé, en raison de la plus grande simplicité de leur construction.

La *fig.* 429 représente une coupe d'une lampe de ce genre. Le réservoir intérieur, destiné à contenir l'huile, fait fonction de corps de pompe. Un piston A est disposé dans ce réservoir, de manière à s'appuyer contre ses parois par tout son contour. Un ressort en hélice, fixé d'une part au piston, d'une autre part aux parois supérieures du réservoir, exerce constamment une pression sur le piston; cette pression se transmet à l'huile située au-dessous du piston, et l'oblige à monter par le tuyau d'ascension C, qui la conduit jusqu'au bec. A mesure que le piston descend, la tension du ressort diminue, et au contraire la hauteur à laquelle

[redacted]

être élevée augmente; ces deux causes doivent donc à diminuer progressivement la vitesse avec laquelle menée au bec. Mais, à l'aide d'une disposition partist parvenu à rendre le mouvement ascendant du liquide ment régulier. Voici en quoi consiste cette

d'ascension C est formé de deux parties qui une dans l'autre, *fig.* 430. La partie inféixée au piston, qu'elle traverse, et descend s l'action du ressort moteur. La partie supécontraire, reste immobile, et sert, pour ainsi lne à l'autre, qui glisse à son intérieur en avec le piston. Une tringle GG, représentée *fig.* 431, se trouve placée suivant l'axe du ension CC, et descend jusque dans férieure. L'huile, en montant, est asser dans l'espace annulaire étroit entre les parois du tuyau d'ascencontour de cette tringle ; il en résistance au mouvement du liquide, e son mouvement ascendant est lais, en outre, la tringle GG n'est rs engagée de la même quantité tie la plus étroite du tuyau d'asst-à-dire dans la partie de ce tuyau rps avec le piston et qui descend le passage étroit qui existe dans du tuyau, tout autour de la tringle longueur d'autant plus grande que t plus élevé, et par conséquent que st plus tendu. On voit donc que la pposée au mouvement du liquide gle GG, que l'on nomme le *modérateur*, dilus en plus, à mesure que le piston descend, à mesure que la force du ressort décroît, et uteur à laquelle l'huile doit être élevée va ntant ; on conçoit qu'on ait déterminé les du modérateur, de telle manière que le t ascendant de l'huile soit sensiblement ré-

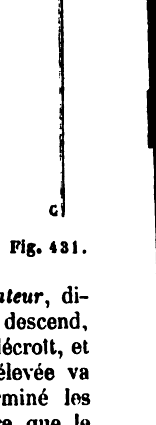


Fig. 431.

Fig. 430.

uile qui arrive au bec ne se brûle pas ; il en retombe une ntité qui vient se placer dans le réservoir, au-dessus

du piston, de manière à baigner les spires inférieures du ressort. C'est aussi dans cette partie du réservoir que l'on introduit l'huile pour remplir la lampe, et alors le ressort est complétement immergé. Supposons qu'on veuille faire fonctionner la lampe, dont le réservoir a été précédemment rempli d'huile ; ou bien que cette lampe fonctionnant déjà depuis quelque temps, et le piston s'étant abaissé jusqu'au bas de sa course, on ait besoin de faire passer au-dessus de lui toute l'huile qui le surmonte, et qui est redescendue du bec. Il suffira de tourner la clef qui communique au pignon D, *fig.* 429. Ce pignon, en tournant, fera monter la tige à crémaillère BB, avec laquelle il engrène, et soulèvera en même temps le piston qui est fixé à cette tige. Les bords du piston sont simplement formés d'une bande de cuir *aa*, qui est recourbée vers le bas, et qui s'applique contre les parois du réservoir, en raison de la pression exercée contre elle par l'huile qui cherche à sortir. Lorsque le piston s'élève, par suite de l'action du pignon D sur la crémaillère BB, il tend à se produire un vide sous sa face inférieure ; la pression diminue au-dessous de lui, et l'huile qui le surmonte, pressée par l'atmosphère avec laquelle elle communique librement, fait fléchir la bande de cuir *aa*, pour se rendre dans le compartiment inférieur du réservoir, en passant tout autour du piston.

Le bouton opposé à la clef du pignon D est destiné à faire monter la tige à crémaillère EE, qui sert à élever plus ou moins la mèche, à l'intérieur du bec F.

§ 371. **Presse hydraulique.** —Nous avons déjà fait connaître (§ 217) le principe de la presse hydraulique. Occupons-nous maintenant d'indiquer la disposition qu'on donne à cette machine. La *fig.* 432 la représente dans son ensemble, et la *fig* 433 en est une coupe, destinée à montrer les parties intérieures. Un cylindre très solide A renferme le piston B, auquel on doit appliquer une grande pression par l'intermédiaire de l'eau. Ce piston B porte sur sa tête un plateau C. C'est entre ce plateau, mobile avec le piston B, et le plateau fixe D, fortement relié au cylindre A par les colonnes E, E, que l'on met les corps à comprimer. L'eau est introduite dans le cylindre A au moyen d'une pompe F. Un levier GH, mobile autour du point H, se termine par une poignée G ; on le saisit par cette poignée, et on lui donne un mouvement de va-et-vient, en l'élevant et l'abaissant successivement. Ce mouvement se transmet au piston I de la pompe F, dont la tige est reliée au levier GH par une petite bielle articulée, d'une part à ce levier, d'une autre part à la tige du piston. Le mouvement du piston est d'ailleurs guidé par un anneau fixe K, dans lequel se meut librement l'extrémité supé-

...eure de sa tige. A chaque coup de piston, de l'eau est puisée dans un réservoir placé sous la pompe, puis refoulée dans le tuyau L,

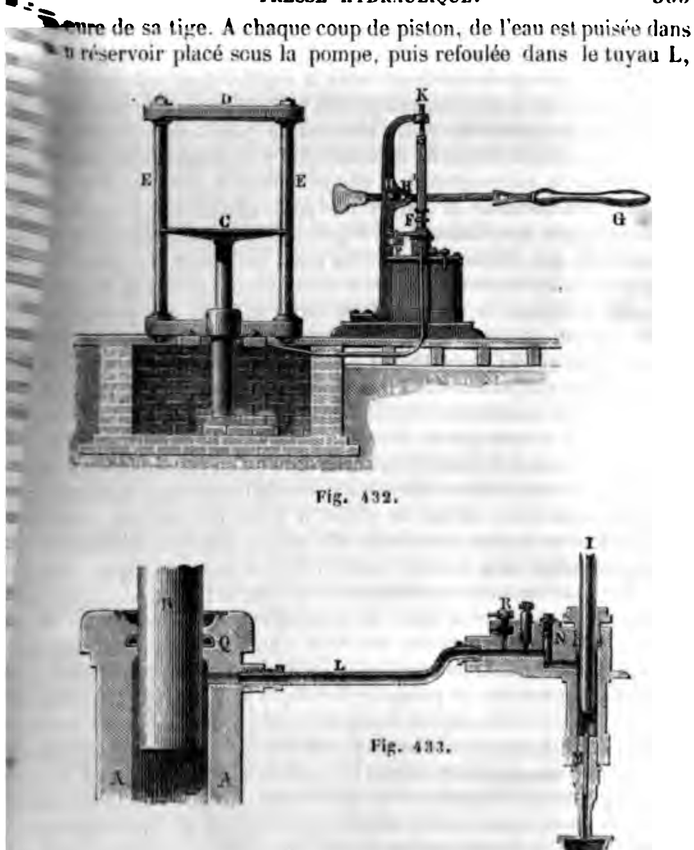


Fig. 432.

Fig. 433.

qui communique avec le cylindre A. M et N sont les deux soupapes qui établissent et interceptent alternativement la communication du corps de pompe avec le tuyau d'aspiration et avec le tuyau de refoulement L.

On voit que la pompe F, à l'aide de laquelle l'eau est refoulée dans le cylindre A, est une pompe à piston plongeur, comme celles de Marly, que nous avons décrites précédemment (§ 362). Le cylindre *A et le piston* B ont aussi une disposition analogue. Pour réa-

liser l'idée de Pascal, qui, comme nous l'avons dit, est l
de la presse hydraulique, il y avait à vaincre une diffic
se présente pas au même degré dans la construction d
il fallait trouver le moyen d'empêcher toute espèce de
la surface du piston B, et les portions de parois du
contre lesquelles il frotte en montant. S'il y avait une
très petite, la faible quantité d'eau introduite à chaq
piston I déterminerait la sortie d'une égale quantité d
contenue dans le cylindre A, et la pression transmise
ne pourrait pas dépasser une limite assez restreinte.
rapportée à l'unité de surface est la même sous le pisto
le piston I, lorsque la soupape N est ouverte, c'est-à-
ment où l'eau est refoulée par le piston I ; cependant u
se produirait autour de ce dernier piston n'entraînerait
conséquence que si elle avait lieu autour du piston B.
effet, que si le mouvement du piston I est un peu rapide
qu'il refoule n'aura pas le temps de sortir par la fui
supposons exister le long de sa surface, et qu'en cons
portion de cette eau devra toujours passer de l'autre cô
pape N. C'est donc autour du piston B qu'on doit su
les fuites avec le plus grand soin, afin que la pression
ce piston puisse être rendue considérable, et aussi a
pression persiste lorsqu'on ne manœuvre plus le pisto

Bramah, ingénieur anglais, est le premier qui soit
1796) à remplir la condition qui vient d'être indiqué
struire des machines réellement utiles, d'après le princi
Depuis cette époque, la presse hydraulique joue un r
portant dans l'industrie. Le moyen imaginé par Bram
pêcher l'eau de passer autour du piston B consiste à é
de ce piston une garniture de cuir Q d'une espèce parti
une sorte de bourrelet formé de la manière suivante :
morceau de cuir en forme de disque circulaire ; on pra
au milieu de ce disque, une ouverture circulaire, de r
laisser qu'un anneau plat ; enfin, après avoir amolli le
séjour prolongé dans un liquide, on façonne cet ann
nière à refouler ses bords i
extérieurs au-dessous de son
donner la forme qui est repr
fig. 434. La pièce de cuir, ain
prend le nom de *cuir emb*

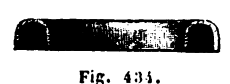


Fig. 434.

place vers le haut du cylindre A, dans une cavité cir
posée à cet effet, et l'on introduit le piston B, qui fro

[redacted]

eurs. Lorsque de l'eau est introduite dans le cylindre A, jusque dans la concavité annulaire que présente le cuir tout son contour ; la pression qu'elle exerce contre ce ses bords contre la surface du piston B, et cela d'au-ement que cette pression est plus considérable, en sorte t se produire aucune fuite.

on a placé des corps à comprimer, entre les deux pla-*fig.* 432, et que l'on manœuvre le levier GH, on n'a ıne faible pression à exercer sur l'eau ; cette pression mesure que les corps se compriment, et l'on éprouve de plus en plus grande à faire jouer la pompe F. Si la pression qu'on peut ainsi exercer sur l'eau, en agissant du levier, n'est pas suffisante pour l'effet qu'on veut ı retire le boulon H, qui sert de point d'appui au levier, duit en H'. De cette manière on diminue de moitié le er sur lequel agit la résistance provenant du piston I : par conséquent, avec une même force appliquée à la xercer une plus grande pression sur le liquide intérieur. er que la pression transmise au liquide ne devienne trop qui pourrait avoir pour résultat de déterminer la rup-ıines parties de la machine, on dispose près de la pompe ıpe de sûreté, qui est ici représentée à part, *fig.* 435. e conique O intercepte un conduit l'eau contenue à l'intérieur de la rait s'écouler au dehors ; cette sou-te sur sa tête une pression produite ır qui est chargé d'un poids P à son On détermine d'avance ce poids P, ıière que la soupape O ne cède à la liquide que lorsque cette pression dépasse la limite en uelle on veut toujours la maintenir.

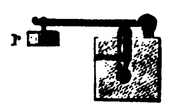


Fig. 435.

R, *fig.* 433, dont l'extrémité inférieure forme soupape, uellement un autre conduit par lequel l'eau intérieure ılement s'écouler. On se sert de cette vis lorsqu'on veut l'action de la presse. En la faisant tourner dans un able, on ouvre le conduit qu'elle fermait : l'eau inté-ule au dehors, et le piston B, n'étant plus soumis à la lui transmettait le liquide, redescend à l'intérieur du

ait se demander si, en donnant des formes différentes à *érieure du piston* B, on ne ferait pas varier la gran-*ression totale qui* tend à le soulever. Pour une même

pression appliquée au liquide à l'aide du piston I, produir
d'effet sur le piston B, en le terminant inférieurement p
concave, qu'en le terminant en pointe ? Si l'on a bien c
principes relatifs aux pressions qu'un liquide exerce sur
avec lesquelles il est en contact (§ 220 et suiv.), on n'h
à dire que la pression totale qui tend à soulever le pisto
pend nullement de la forme de la partie de ce piston qu
gée dans le liquide ; elle ne dépend que de la grandeur
tion transversale du piston, dans la partie de sa surfa
placée au milieu du cuir embouti. Si cette section trans
10 fois, 100 fois, 1000 fois plus grande que la section
du piston I, la pression supportée par le piston B sera 1
fois, 1000 fois plus grande que celle qu'on applique au
l'aide du levier GH (§ 217). On doit observer que, sous c
il y a une très grande différence entre les lois des press
corps solide éprouve de la part d'un liquide en repos, ou
d'un liquide en mouvement. Dans ce dernier cas, les pres
vent être très différentes, pour des corps de même sect
versale, rencontrés par un même liquide animé d'une mêm
si les surfaces que le liquide vient rencontrer n'ont pa
forme (§ 328).

§ 372. La presse hydraulique est très employée dans l
On s'en sert pour comprimer les draps et les papiers, d
brication des bougies, du vermicelle, etc., etc. En gén
qu'on a à excercer une très forte pression, on a recours
lement à la presse hydraulique, qui est d'un usage très
C'est ainsi que, dans l'établissement impérial de la Chaus
de Nevers, où l'on fabrique des câbles de fer pour la m
éprouve les câbles en les soumettant à une force de trac
duite au moyen d'une presse hydraulique

Nous avons dit (§ 186) que les roues des wagons desti
culer sur les chemins de fer sont fixées aux extrémités de
en sorte que chaque essieu et les deux roues qui le term
ment une seule pièce solide. L'essieu et chacune des d
se construisent cependant à part, et ce n'est que lorsqu
pièces sont achevées qu'on les réunit. A cet effet, on a
extrémités de l'essieu pour leur donner une forme très l
conique, et l'on a pratiqué dans les moyeux des roues des c
d'une forme exactement pareille à la précédente, destiné
voir à leur intérieur les extrémités des essieux. Mais ces p
travaillées de telle manière qu'on ne peut faire ainsi pé
extrémités des essieux dans les ouvertures centrales

[redacted]

appliquant des efforts considérables. C'est encore à la
raulique que l'on a habituellement recours pour exercer

emment, on a construit en Angleterre un pont tubulaire
se le bras de mer compris entre le comté de Carnarvon et
lesey. Ce pont, d'une longueur totale de 455 mètres, est
leux immenses tubes de tôle, placés à côté l'un de l'au-
érieur desquels passent les deux voies du chemin de fer
à Holyhead ; il n'est supporté entre ses extrémités que
ours, qui le divisent en quatre travées dont les deux
plus grandes que les deux autres, ont chacune 140 mètres
. Les portions de tubes correspondant à ces travées
ont été construites séparément au bord de la mer ; on
sportées sur des pontons, jusqu'au pied des tours qui
rmer les piles du pont ; et c'est ensuite à l'aide de presses
es qu'on a élevé ces tubes gigantesques, pour les poser
t de ces tours.

EMPLOI DE L'EAU COMME MOTEUR.

Création d'une chute d'eau. — Lorsque nous avons
s diverses espèces de moteurs (§ 197), nous avons indiqué
'eau comme constituant un moteur de la plus grande im-
Nous sommes en mesure maintenant d'entrer dans les dé-
nts convenables, pour faire connaître le mode d'action de
moteur, ainsi que les dispositions des diverses machines
§ 198) qui reçoivent cette action pour la transmettre à
smes de toute sorte destinés à effectuer du travail utile.
'ement de l'eau dans un cours d'eau est dû à l'action de
ır. Chaque molécule liquide, en parcourant une portion
d'eau, s'abaisse verticalement d'une certaine quantité :
ment donne lieu à la production d'une certaine quantité
moteur, qu'on obtiendrait en multipliant le poids de la
ır la différence de niveau des deux extrémités du chemin
ırcouru (§ 76). C'est ce travail, développé par l'action de
r sur les diverses molécules liquides, qu'il s'agit d'utili-
de le laisser absorber par le travail résistant qu'occa-
ottement de l'eau sur elle-même et sur les parois solides
elles elle est renfermée (§ 310).
rriver, on établit un barrage à travers le cours d'eau. Ce
pposant au passage de l'eau qui arrive constamment dans
n l'a établi, il en résulte que le niveau de l'eau s'élève
s'abaisse en aval. Concevons que le barrage se termine

vers le haut par une crête horizontale, et que l'eau, ap
cumulée dans le bief d'amont, s'écoule dans le bief d'a
par-dessus cette crête, ce qui constituera un déverso
mouvement s'établira de manière que la quantité d'e
le déversoir, dans un temps donné, soit précisément
qui passait dans le même temps à travers une sectio
du cours d'eau, avant l'établissement du barrage.
d'eau, en passant ainsi du bief supérieur dans le bief
bera d'une hauteur égale à la différence de niveau d
ces deux biefs ; en multipliant cette hauteur par le
écoulée, on aura la mesure du travail moteur dév
chute du liquide, travail que l'on pourra utiliser, e
à une machine.

§ 374. **Force d'une chute d'eau.** — D'aprè
d'être dit, il est aisé d'évaluer en chevaux-vapeur (
de la chute qu'on produirait dans un cours d'eau dor
débit, en y établissant un barrage qui donnerait lieu
de niveau déterminée dans les biefs d'amont et d'ava
exemple la Seine, à Paris, et cherchons la force de l
obtiendrait en construisant un barrage dans le l
fleuve, un peu au-dessus du Pont-Neuf, comme o
Ce bras de la Seine, au moment des basses eaux, dél
mètres cubes d'eau par seconde. Le barrage don
question pourrait donner lieu à une chute de 1^m,
Donc cette chute produirait, en une seconde, un tra
kilogrammètres. Si l'on divise ce nombre par 75,
la force de la chute qu'on veut créer près du Pont
évaluée à 2000 chevaux-vapeur, pour l'époque de

Les éléments qui entrent dans la détermination
chute d'eau varient aux diverses époques de l'anr
la quantité d'eau que débite le cours d'eau en une
ou moins grande ; d'une autre part, la différence de
biefs d'amont et d'aval diminue à mesure que le
Quoique ces deux éléments varient en sens contrair
il en résulte toujours une variation de même sens
la chute ; cette force est d'autant plus grande qu
fournit une plus grande quantité de liquide en un

§ 375. **Conditions que doivent remplir les** [...] **drauliques.** — L'eau d'une chute peut rarement a
sans intermédiaire, pour produire du travail utile ;
cependant quelques exemples. Le plus ordinairem
une machine, qui n'a d'autre objet que de recevo

..smettre ensuite aux machines spéciales qui doivent l'utiliser. ..t naturellement se proposer de construire cette machine mo-.. telle manière que l'eau de la chute lui transmette la totalité ..vail moteur qu'elle produit en tombant du bief supérieur dans ..inférieur. Il est impossible de satisfaire complétement à cette ..ion ; mais il faut chercher à en approcher le plus possible.

..r donner une idée nette de la force d'une chute d'eau, nous .. supposé qu'après avoir construit un barrage en travers du ..d'eau, on laissait l'écoulement de l'eau s'établir naturellement ..essus la crête du barrage ; en sorte que l'eau tombait libre-..depuis le niveau du bief d'amont jusqu'à celui du bief d'aval, ..t le travail produit par cette chute du liquide qu'il s'agirait ..ansmettre à une machine motrice. Mais il n'est pas nécessaire ..'eau quitte le bief d'amont à la hauteur de la surface libre du ..de qui y est contenu ; on peut pratiquer une ouverture dans ..arrage, soit vers le bas, soit en un point quelconque situé en-..es niveaux des deux biefs, et la quantité de travail que l'eau ..capable de produire, en se rendant ainsi d'un bief dans l'au-.. sera toujours la même que si elle tombait librement d'un ni-.. à l'autre. C'est ce dont on s'assurera sans difficulté, en exa-..nt, par exemple, ce qui aurait lieu, si l'écoulement de l'eau se ..uisait par l'ouverture d'une vanne située à la hauteur du ni-.. dans le bief inférieur ; la vitesse d'écoulement du liquide par .. ouverture serait précisément la même que celle qui aurait ..cquise par ce liquide, s'il était tombé librement de toute la ..eur de la chute (§ 285). En sorte que, si l'on ne veut faire agir .. sur une machine motrice, qu'après qu'elle aura pris toute la ..se qu'elle peut recevoir de l'action de la pesanteur, en raison .. hauteur de la chute, peu importe qu'on la fasse arriver d'une ..ère ou de l'autre au niveau du bief inférieur, puisque dans les .. cas elle acquerra la même vitesse.

..n pourrait objecter, il est vrai, qu'en faisant passer l'eau du ..supérieur dans le bief inférieur, par l'ouverture d'une vanne, ..ourrait donner à cette ouverture des dimensions telles qu'il ..ulerait dans un temps donné une quantité d'eau beaucoup plus ..de que celle qui se serait écoulée dans le même temps par le .. du barrage ; et que, comme la vitesse du liquide est toujours .. qui est due à la hauteur de la chute, la quantité de travail ..uite pendant le temps dont il s'agit aurait été augmentée par ..ploi d'une vanne. Cette augmentation de travail ne fait pas de ..e ; mais il faut observer que la vanne, en débitant plus d'eau ..n'en fournit le cours d'eau, détermine un abaissement du ni-

veau dans le bief d'amont ; ce bief se vide, et, par cons
sera obligé de fermer la vanne pendant quelque temps,
dre qu'il se remplisse de nouveau. En somme, si l'on v
régulièrement de l'action d'une chute d'eau, on devra fai
par exemple, que le niveau du bief d'amont soit le mê
mencement de chaque journée ; et, par suite, la vanne
manière qu'on la manœuvre dans l'intervalle de 24 heur
toujours laisser passer que la quantité d'eau fournie p
d'eau pendant ce temps. L'emploi d'une vanne laissant
vers le bas de la hauteur de chute n'augmentera donc p
tité totale de travail produite par l'eau dans l'espace d'
mais cela permettra de répartir ce travail autrement q
rait, si l'eau s'écoulait par le haut du barrage, comme
supposé d'abord. C'est ainsi que, si chaque jour on n'o
que 12 heures, au lieu de la laisser ouverte pendant le
le travail produit en une heure pourra être doublé : ur
la force aurait été évaluée à 15 chevaux (§ 374) agirait
12 heures avec une force de 30 chevaux.

Il résulte de ce qui précède que la quantité de travai
capable de produire est toujours la même, de quelque r
la fasse passer du bief supérieur dans le bief inférieu
pour cela, bien entendu, que les circonstances dans
produit cet écoulement ne donnent lieu à aucune per
car une pareille perte entraînerait nécessairement u
respondante dans la quantité de travail que la vitesse
produire en agissant sur la machine motrice. Il fa
quence, disposer les orifices par lesquels l'eau doit
manière à éviter les changements brusques de direc
liquides, c'est-à-dire qu'il faut employer des orifices év
ont doit aussi éviter de faire couler l'eau avec une g
dans un canal d'une certaine longueur, afin de ne pa
aux pertes de vitesse occasionnées par les frottemen
sur les parois et sur lui-même (§ 301).

Si nous examinons maintenant la machine motric
l'eau doit transmettre le travail développé par sa chu
rons que l'eau arrive dans cette machine avec une cer
qui peut être grande ou petite, suivant les cas, et qu
ensuite pour se rendre dans le bief inférieur. Sans non
des dispositions diverses qu'on peut donner à une pare
dispositions que nous indiquerons en détail dans un i
pouvons reconnaître qu'en général elle doit satisfaire à
tions essentielles. Premièrement, l'eau doit agir sans c

[redacted]

que, depuis le moment où elle est sur le point d'entrer dans achine, jusqu'au moment où elle l'a abandonnée complétement, e doit pas y avoir de changements brusques, soit dans la di-tion, soit dans la grandeur de la vitesse des différentes molécules ides. Secondement, l'eau doit sortir de la machine de manière avoir qu'une très faible vitesse, sinon une vitesse nulle, lors-elle arrive dans le bief inférieur ; car si elle y arrivait avec une sse appréciable, elle serait capable de produire une certaine ntité de travail, en raison de cette vitesse, et en conséquence n'aurait pas transmis à la machine motrice la totalité du travail elle pouvait produire.

Ainsi, en résumé, dans l'établissement d'un moteur hydraulique, doit toujours avoir en vue de satisfaire aux conditions suivantes : l'eau doit être amenée du bief d'amont dans la machine, en éprou-nt le moins possible de perte de vitesse; 2° elle doit agir sans oc; 3° elle doit arriver sans vitesse dans le bief d'aval. Ces condi-ns ne peuvent pas être remplies d'une manière rigoureuse; aussi rrive-t-il jamais que la force d'un moteur hydraulique soit la me que celle de la chute qui le fait mouvoir : elle n'en est qu'une ction plus ou moins grande, suivant que le mode d'action de l'eau rapproche plus ou moins de l'état idéal qui est indiqué par les iditions précédentes. Pour juger de la bonté d'un moteur hydrau-ue, on déterminera par l'expérience (§ 199) la quantité de travail 'il est capable de produire dans un temps donné, et l'on cherchera rappor. de cette quantité de travail à celle que fournit la chute au dans le même temps ; le moteur sera d'autant meilleur que ce port se rapprochera plus de l'unité.

§ 376. **Roue en dessous, à aubes planes.** — Entrons main-ant dans le détail des diverses dispositions qui ont été imaginées ır les moteurs hydrauliques. Le plus habituellement, ces moteurs ıt des roues auxquelles l'eau imprime un mouvement de rotation our de leur axe, qui est placé, soit horizontalement, soit vertica-ıent ; ces roues prennent le nom de *roues hydrauliques*. Nous ıdierons d'abord celles dont l'axe est horizontal. On les divise linairement en *roues en dessous*, *roues en dessus*, et *roues de côté*, vant que l'eau arrive dans la roue vers sa partie inférieure, ou rs sa partie supérieure, ou bien en un autre point de son contour.

La roue en dessous à aubes planes, *fig.* 436, se place en avant ıne vanne qu'on lève d'une certaine quantité, pour laisser couler au par sa partie inférieure. L'eau sort de la vanne avec la vitesse e à la hauteur du niveau dans le bief au-dessus de l'orifice ; un ursier *horizontal, ou* légèrement incliné, l'amène sous la roue, et

elle lui imprime un mouvement de rotation, en exerçant une pr
sur les aubes ou palettes dont elle est munie sur tout son co
Sous l'action de l'eau, la roue prend une certaine vitesse, qui
des résistances qu'elle a à vaincre; cette vitesse est d'autan
petite que les résistances sont plus considérables. On s
effet, que la pression exercée par l'eau sur les aubes de l
lorsqu'elles sont en mouvement, n'est pas la même que lors
sont immobiles; et que, de plus, cette pression est d'auta
faible qu'elles se meuvent plus rapidement (§ 327). Il en

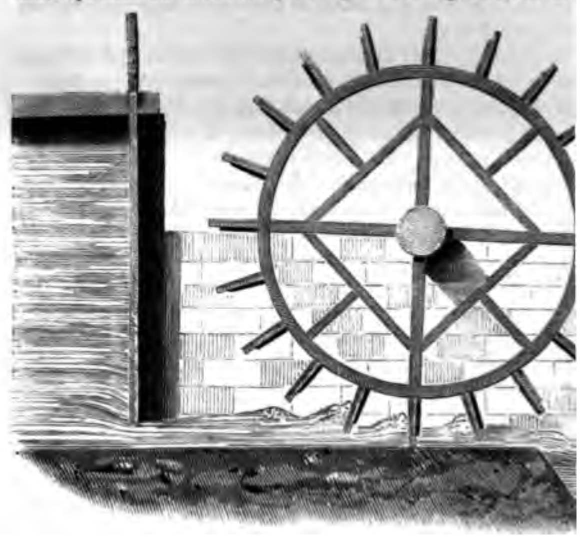


Fig. 436.

que, pour vaincre une résistance donnée, la roue prendra, so
tion de l'eau, une vitesse particulière, pour laquelle la pres
l'eau sur les aubes soit en rapport avec la grandeur de cett
tance. Si, par une cause quelconque, sa vitesse devenait a
tellement plus petite, la pression de l'eau sur les aubes aug
rait; une portion seulement de cette pression ferait équilib
résistance, et l'autre portion accélérerait le mouvement de l
jusqu'à ce que l'équilibre fût rétabli entre la pression exer
l'eau et la résistance à vaincre. Si, au contraire, la roue
momentanément un mouvement plus rapide, la diminution

sulterait dans la pression de l'eau sur les aubes rendrait la sistance prédominante, et le mouvement se ralentirait.

On conçoit, d'après ce qui précède, que l'on puisse faire prendre la roue telle vitesse qu'on voudra, en réglant convenablement la grandeur de la résistance qu'elle aura à vaincre. Mais la quantité de travail réellement transmise à la roue par l'action de l'eau ne sera pas la même, suivant que la roue tournera avec telle ou telle vitesse. Pour que la roue marche très rapidement, il faut qu'elle n'ait à vaincre qu'une faible résistance; si on lui oppose une résistance considérable, elle ne prendra qu'un mouvement très lent. Or, le travail effectué par la roue dans un temps donné dépend à la fois de la grandeur de la résistance vaincue, et de l'étendue du chemin parcouru pendant ce temps, par le point d'application de cette résistance, ou, ce qui revient au même, de la vitesse de la roue. Dans l'un et dans l'autre des deux cas extrêmes qu'on vient de considérer, l'un des éléments du travail est très petit, et, par suite, le travail lui-même ne peut pas être grand. Il doit donc exister une certaine vitesse de la roue, qui ne soit ni trop grande ni trop petite, pour laquelle le travail effectué surpasse celui que la roue produirait avec toute autre vitesse. L'expérience a appris que, pour obtenir ce maximum de travail, il faut que la vitesse de la roue, mesurée à sa circonférence, soit les 0,45 de celle de l'eau, au moment où elle arrive sur les aubes.

Les roues en dessous à aubes planes sont loin de satisfaire aux conditions que nous avons indiquées en général pour les moteurs hydrauliques (§ 375). En premier lieu, l'eau perd une portion de sa vitesse, avant d'atteindre la roue, par son frottement contre les parois du coursier qui l'amène de la vanne sur les aubes ; en second lieu, au moment où l'eau rencontre une des aubes de la roue, elle perd brusquement sa vitesse, pour prendre la vitesse de la roue ; en troisième lieu, l'eau quitte la roue en conservant une vitesse considérable, qui donne lieu à ce bouillonnement que l'on observe dans le bief d'aval, jusqu'à une grande distance de la roue. Aussi les roues de cette espèce sont-elles de très mauvais moteurs hydrauliques. En mesurant, à l'aide du frein dynamométrique, la quantité de travail transmise par l'eau à la roue, on a reconnu que, lorsque la roue a la vitesse la plus convenable, cette quantité de travai ne dépasse pas les 0,25 de celle qui correspond à la quantit d'eau dépensée; le quart seulement de la force de la chu est utilisé par la roue, et les trois autres quarts sont entièreme perdus.

§ 377. Roue à augets. — La roue en dessus, ou roue à au

fig. 437, est disposée de manière que l'eau soit amenée à sa partie supérieure par un canal qui la prend dans le bief d'amont, au niveau de la surface du liquide dans ce bief. L'eau ne prend dans ce canal que la vitesse nécessaire pour qu'elle puisse atteindre la roue; elle tombe de là dans des compartiments ou *augets* dont la roue est munie sur tout son contour, et les remplit successivement, à mesure que, par le mouvement de la roue, ils se présentent à l'extrémité du canal d'amenée. Lorsque les augets arrivent au bas de la roue, l'eau en sort pour tomber dans le bief d'aval, et

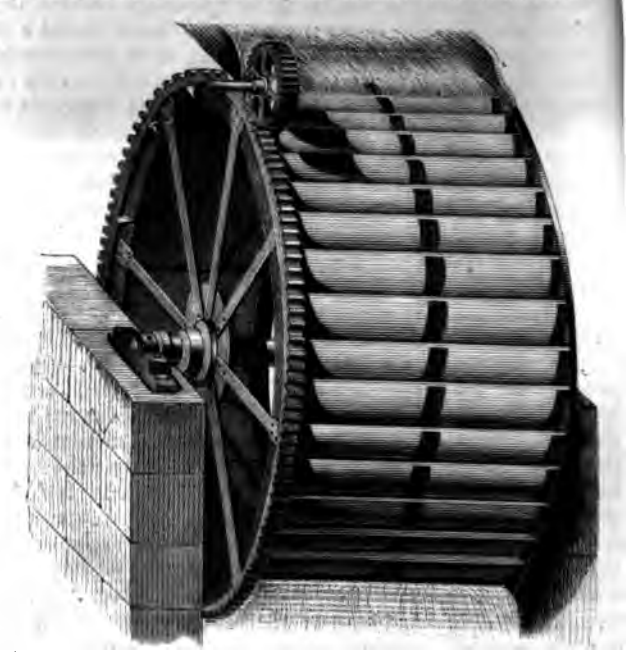


Fig. 437.

ils remontent vides, pour se remplir de nouveau lorsqu'ils seront sur le point de redescendre. On voit, par là, que les augets compris dans la partie descendante de la roue sont constamment pleins d'eau, tandis que ceux qui se trouvent dans la partie ascendante sont ...les; c'est le poids de l'eau qui est ainsi contenue dans une moi...

de la roue, qui détermine son mouvement et lui fait vaincre des résistances.

Dans la construction d'une roue de ce genre, on doit surtout avoir en vue de disposer les augets de manière qu'ils ne se vident que le plus bas possible ; car si l'eau en sort avant qu'ils aient atteint le bas de la roue, il en résulte une perte de travail. Mais il faut, en même temps, que l'ouverture de chaque auget ne soit pas trop étroite, afin que l'eau puisse y entrer et en sortir sans difficulté. Les *fig*. 438, 439 et 440 montrent des dispositions qui sont fréquem-



Fig. 438.



Fig. 439.



Fig. 440.

ment adoptées. Pour que l'air qui doit sortir de l'auget lorsque l'eau y arrive, ou bien qui doit y entrer lorsque l'auget se vide, ne gêne pas le passage du liquide, ce qui pourrait nuire beaucoup à l'effet produit, on a soin de pratiquer quelques petits trous au fond de l'auget. La présence de ces trous occasionne bien la perte d'une certaine quantité d'eau, qui les traverse et ne reste pas dans l'auget ; mais cette perte est de peu d'importance.

Une roue à augets donne des résultats d'autant meilleurs qu'elle tourne plus lentement, et cela pour plusieurs motifs. D'abord le mouvement de rotation de la roue, auquel participe l'eau contenue dans les augets, détermine une force centrifuge qui modifie la forme de la surface libre du liquide dans chaque auget ; cette surface s'abaisse vers l'intérieur de la roue, et se relève vers l'extérieur, de telle sorte que l'eau tend à sortir de l'auget plus tôt qu'elle ne le ferait sans cela. D'un autre côté, l'eau arrivant avec une faible vitesse par le canal d'amenée, ne produira pas de choc à son entrée dans les augets, si la roue ne marche que lentement ; et lorsque les augets se videront, l'eau sera, pour ainsi dire, déposée sans

vitesse dans le bief d'aval. Avec cette condition d'une faible vitesse de rotation, on voit que la roue à augets satisfait beaucoup mieux que la roue en dessous aux conditions générales qu'on doit chercher à faire remplir aux moteurs hydrauliques. Aussi les roues à augets bien établies utilisent-elles les 0,75 du travail moteur développé par l'action de l'eau. Ces roues doivent être employées de préférence à toutes les autres, pour les chutes dont la hauteur est comprise entre 3 mètres et 12 mètres.

Le mouvement de rotation d'une roue à augets devant être lent, on la munit ordinairement d'une roue dentée, qui fait corps avec elle, et qui engrène avec une roue beaucoup plus petite. On transmet ainsi à l'arbre de cette seconde roue un mouvement de rotation aussi rapide qu'on veut.

§ 378. **Roue de côté.** — La roue de côté, *fig.* 441, est une roue

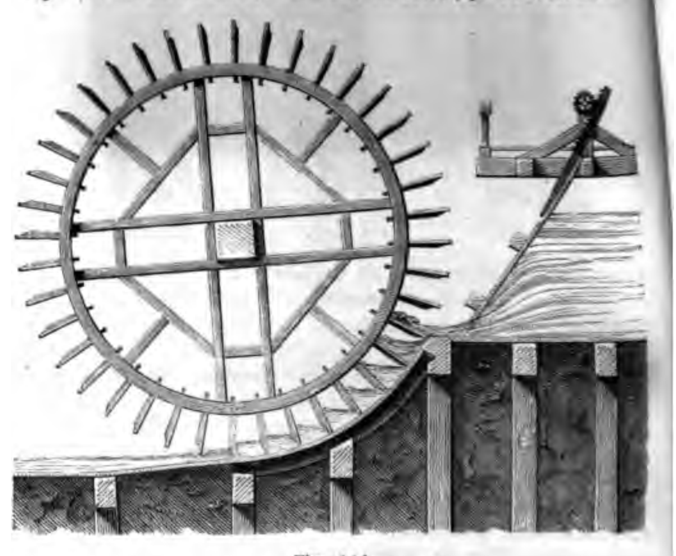


Fig. 441.

à aubes planes qui est emboîtée dans un coursier circulaire, et qui reçoit l'eau à la partie supérieure de ce coursier. Elle tient à la fois de la roue en dessous et de la roue à augets. L'eau agit d'abord sur les aubes par son choc, au moment où elle entre dans la roue; puis elle est maintenue sur ces aubes par le coursier, qui s'oppose

lle s'écoule de part et d'autre, et elle agit ainsi par son squ'à ce qu'elle soit arrivée au bas de la roue.
riant la disposition de la roue, on peut faire prédominer noins l'un ou l'autre de ces deux modes d'action de l'eau ; clair que, d'après ce que nous avons dit dans les para-précédents, on devra surtout chercher à rapprocher la roue le la roue à augets, qui utilise une bien plus grande por-ravail moteur développé par l'eau que la roue en dessous. , au lieu de donner l'eau à la roue par le bas d'une vanne, , on la fait arriver sur les aubes par le haut d'une vanne isse, *fig.* 442, de manière à produire l'écoulement comme

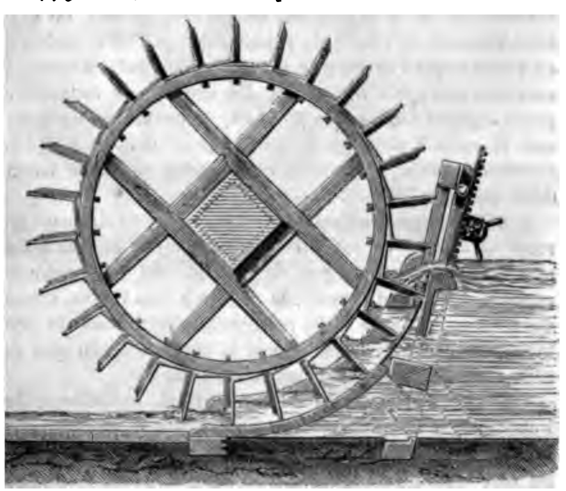


Fig. 442.

èversoir. L'eau vient ainsi rencontrer les aubes avec une esse, et agit presque exclusivement par son poids pour rner la roue.
compare la roue de côté, disposée comme nous venons de n dernier lieu, avec la roue à augets, on verra qu'elle pré-rtains avantages relativement à cette dernière roue. Pre-nt, l'eau comprise entre les aubes ne cesse d'agir par son e lorsqu'elle est arrivée au bas de la roue ; tandis que, dans augets, l'eau sort toujours des augets avant d'avoir atteint *la roue. Secondement*, la roue n'a pas à supporter la tota-

lité du poids de l'eau qui agit sur elle ; car la pression exercée sur chaque aube par l'eau qui la surmonte n'est qu'une composante du poids de cette eau, et le coursier supporte l'autre composante de ce poids ; il en résulte que la roue, tout en recevant de l'eau la même quantité de travail, se trouve beaucoup moins chargée, et, par suite, les frottements de son arbre sur ses supports sont moins considérables. Mais ces avantages sont contre-balancés par des inconvénients, dus à ce que le jeu qui existe nécessairement entre les bords des aubes et le coursier occasionne une perte d'eau, et aussi à ce que l'eau, en se mouvant le long du coursier, en éprouve une résistance assez considérable. Pour éviter que la perte d'eau entre les aubes et le coursier ne soit trop grande, on est obligé de faire mouvoir la roue plus rapidement qu'une roue à augets, et il en résulte que l'eau quitte la roue avec une vitesse notable qui entraîne une perte de travail. En résumé, la roue de côté, disposée comme l'indique la *fig.* 442, donne de moins bons résultats que la roue à augets ; mais elle est de beaucoup préférable à la roue en dessous : elle utilise environ les 0,65 du travail moteur développé par l'eau.

§ 379. **Roue Poncelet.** — Les roues en dessous ont, sur les roues à augets et sur les roues de côté, l'avantage de marcher avec une vitesse assez grande ; ce qui fait que, pour une même quantité d'eau à dépenser, la roue n'a pas besoin d'avoir autant de largeur, puisque l'eau reste beaucoup moins de temps à son intérieur, et qu'en conséquence la quantité d'eau que contient la roue à chaque instant est beaucoup moindre.

On conçoit donc qu'il était d'une grande importance de chercher à modifier la roue en dessous, de manière à lui faire utiliser une fraction plus considérable du travail moteur fourni par l'eau, sans lui ôter l'avantage qui vient d'être signalé. C'est ce qu'a fait M. Poncelet. La roue qu'il a imaginée, et qui porte son nom, *fig.* 443, ne diffère de la roue en dessous, dont nous avons parlé précédemment (§ 376), qu'en ce que les aubes planes y sont remplacées par des aubes courbes, qui sont à peu près tangentes à la circonférence extérieure de la roue.

Il est aisé de comprendre comment cette disposition fait que le travail transmis par l'eau à la roue est plus grand que dans le cas où les aubes seraient planes. D'abord l'eau, à son entrée dans la roue, ne produit pas de choc sur les aubes ; parce que ces aubes, en raison de la forme qui leur a été donnée, ne se présentent au liquide que par leur tranche. D'un autre côté, si l'on fait en sorte que la roue prenne une vitesse convenable, l'eau sortira des aubes

[redacted]

.esse très petite, ainsi qu'il est aisé de le reconnaître nt de quelle manière elle se comporte dans la roue, ntrée jusqu'à sa sortie. On voit, en effet, que l'eau,

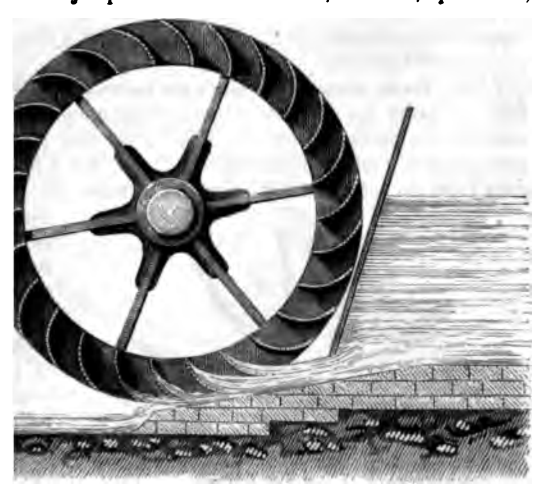


Fig. 443.

chaque aube avec une vitesse plus grande que celle)it glisser sur sa surface et s'élever ainsi dans sa con-u'à ce que la pesanteur ait détruit son mouvement à partir de là elle redescend en glissant sur l'aube en re, et prenant ainsi une vitesse rétrograde de plus en par rapport à l'aube. S'il arrive donc que cette vitesse eau, au moment où elle quitte l'aube, soit égale à celle la roue à sa circonférence, l'eau se trouvera dans les itions que si les dernières portions de l'aube courbe us elle sans l'entraîner ; et, par suite, son mouvement pour ainsi dire nul. Si l'on joint à cela que l'incli-ée à la vanne, inclinaison qui est quelquefois très disparaître à peu près complétement la perte de vitesse par le frottement de l'eau contre les parois du cour-a que la roue Poncelet satisfait, autant que peut le ie en dessous, aux conditions générales énoncées pré-(§ 375).

ce a fait voir que, pour que la roue produise le maxi-

mum d'effet, il faut que sa vitesse, à la circonférence, soit les
de celle de l'eau. Dans ce cas, le rapport du travail transmis
roue, au travail que représente la quantité d'eau dépensée, s'é
à 0,56, ou même à 0,60; tandis que, comme nous l'avons dit
rapport est seulement de 0,25, lorsqu'il s'agit d'une roue en
sous à aubes planes.

§ 380. **Roue plongeant dans un courant indéfini.** — P
faire connaître les diverses roues hydrauliques à axe horizon
nous devons encore parler des roues à palettes planes, que
place dans le courant d'une rivière, de manière à les faire plon
dans l'eau par leur partie inférieure. Ces roues, *fig.* 444, que l'
installe ordin
rement sur
flancs de bate
solidement am
rés, sont mises
mouvement p
la pression q
l'eau exerce s
celles de le
palettes qui so
immergées. Il n'
a pas ici à exa
miner si, en don
nant telle ou tell
forme à la roue
on utilisera p
son emploi un
fraction plus o
moins grande d

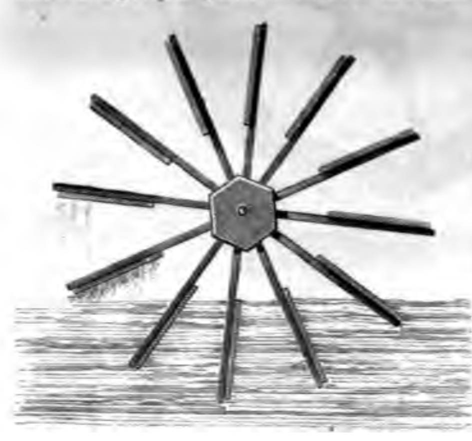


Fig. 444.

travail moteur dont on dispose. Ce travail moteur, développé p
la totalité de l'eau qui coule dans la rivière, est surabondant; o
n'a besoin d'en utiliser qu'une faible portion, et l'on n'est génér
lement pas limité dans la largeur qu'on peut donner à la roue
Aussi préfère-t-on employer une roue d'une construction tr
simple, quoique peu avantageuse, sauf à obtenir par un élargi
sement des aubes ce qu'une meilleure disposition aurait pu donn
avec de moins grandes dimensions.

Une roue de ce genre ne produit pas toujours la même quanti
de travail, suivant qu'elle marche plus ou moins vite, dans l
même courant. L'expérience a fait reconnaître que la vitesse d
palettes, prise au milieu de leur hauteur, devait être les 0,

[redacted]

l'eau, pour que le travail transmis par l'eau à la roue fût grand possible.

. **Roue à cuillers.** — Les roues à axe vertical sont depuis ps employées, surtout dans le midi de la France, pour uvoir des moulins. Elles se prêtent mieux que les autres à e de travail, en raison de la simplicité de la transmission 'ement de la roue motrice à la meule courante (§ 149); le bre vertical porte la roue à sa partie inférieure, et la meule à sa partie supérieure. Ces roues sont de deux espèces : *à cuillers*, et les *roues à cuve.*

oue à cuillers, *fig.* 445, est formée d'une sorte de moyeu

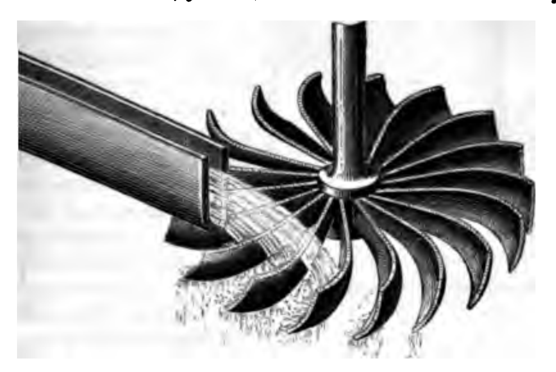


Fig. 445.

uel sont implantées des pièces de bois taillées de manière nter à l'eau une surface concave et oblique ; ces diverses ont désignées sous le nom de *cuillers*. L'eau est amenée oue par un petit canal de bois, ou par une buse adaptée à e inférieure d'un réservoir. Chaque cuiller, en tournant, cevoir l'action de l'eau ; et les chocs successifs que reçoit roue entretiennent son mouvement.

trouvé que ces roues pouvaient utiliser environ le tiers du noteur développé par la chute d'eau ; et que, pour cela, la les points de la roue qui sont directement choqués par l'eau tre environ les 0,70 de celle du liquide. Ces roues cont bien, en raison de leur grande simplicité, pour des chutes grandes qui ne fournissent pas beaucoup d'eau.

. **Roue à cuve.** — Les roues à cuve ont une forme ana-'elle des roues à cuillers ; mais, au lieu d'être isolées et de

recevoir le choc d'une veine liquide qui vient tomber e
de leur contour, elles sont installées dans une cuve cyl
maçonnerie qui est
le bas. L'eau motri
née dans cette cuve
lement à sa circon
un canal A, *fig.* 446
au-dessus de la fac
de la roue; elle tourl
la cuve en vertu
qu'elle possède, et,
dant ainsi dans la r
traîne dans son mo
ratoire. Après avoi
les surfaces courbe
comme les palette
elle tombe au-des
bief d'aval.



Fig. 446.

Le mouvement
la cuve détermine
ments qui diminue
sa vitesse ; d'un autre côté, une portion de l'eau s'écou
duire d'effet, par l'intervalle qui existe entre le conto
et les parois de la cuve. Aussi une roue à cuve n'utilis
que les 0,16 du travail que représente la quantité d'e
et, en la construisant avec tout le soin possible, on ne
élever au delà de 0,25 ce rapport entre le travail tran
et le travail dépensé. Les roues à cuve sont employé
ment lorsqu'on a à sa disposition une grande quantité
d'une faible hauteur.

§ 383. **Roues à réaction**. — Imaginons qu'un v
de l'eau soit disposé de manière à pouvoir tourner t
autour d'une verticale, *fig.* 447, et qu'il soit muni i
de deux tubes horizontaux par lesquels l'eau puisse s'
posons de plus que les tubes soient recourbés à leurs e
sens contraire l'un de l'autre. Aussitôt que l'écoulemer
on verra le vase prendre un mouvement de rotation
opposé à celui dans lequel l'eau sort de chaque tube.
dre compte de la manière dont ce mouvement se p
observer que les molécules liquides, animées d'une c
à l'intérieur de chacun des deux tubes horizontaux,
de changer de direction lorsqu'elles arrivent aux ex

tubes, en raison de la forme qu'on leur a donnée : ce changement dans la direction de la vitesse de chaque molécule ne peut pas s'effectuer sans qu'elle réagisse sur le tube, en produisant une pression en sens contraire : et c'est l'ensemble des pressions ainsi déterminées qui fait tourner l'appareil, et qui pourrait même lui faire produire une certaine quantité de travail. Le nombre des tubes horizontaux d'écoulement pourrait être de 3, 4, 5, etc.; le mouvement de rotation se produirait toujours de la même manière, pourvu que ces tubes fussent tous recourbés dans un sens convenable à leurs extrémités.

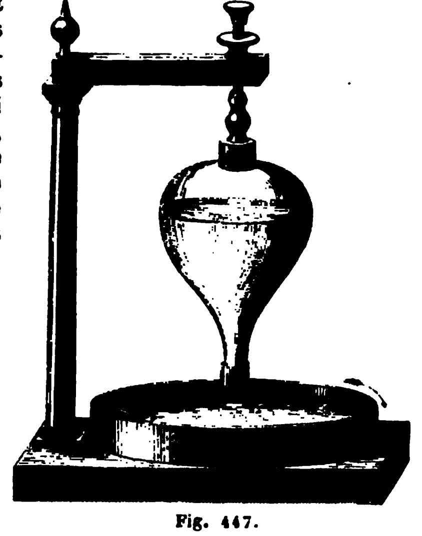


Fig. 447.

Cet appareil est désigné sous le nom d'*appareil à réaction*. Il a servi de type à plusieurs moteurs hydrauliques, appelés *roues à réaction*, qui sont peu employés, et que nous n'examinerons pas en détail.

§ 384. **Turbine Fourneyron.** — Les roues à axe vertical ont reçu, depuis environ vingt-neuf ans, de grands perfectionnements qui les ont mises au rang des meilleurs moteurs hydrauliques qu'on puisse employer. Ces roues perfectionnées ont reçu le nom de *turbines*. Nous allons en faire connaître la disposition.

La première turbine qui ait attiré l'attention générale, par les avantages qu'elle présente, et par les bons résultats qu'elle fournit sous le rapport de la quantité de travail effectué, est celle de M. Fourneyron. Voici en quoi elle consiste. L'eau du bief d'amont A, *fig.* 448, pénètre librement dans un cylindre B qui descend jusqu'au-dessous du niveau du bief d'aval. Ce réservoir cylindrique est fermé à sa base ; mais il est ouvert latéralement, en C, sur tout son contour : en sorte que, si rien ne s'y opposait, l'eau qui arrive dans le cylindre B s'écoulerait par cette ouverture, en formant

une nappe continue qui s'étalerait dans tous les sens. Une roue annulaire D est disposée horizontalement, tout autour de l'ouverture

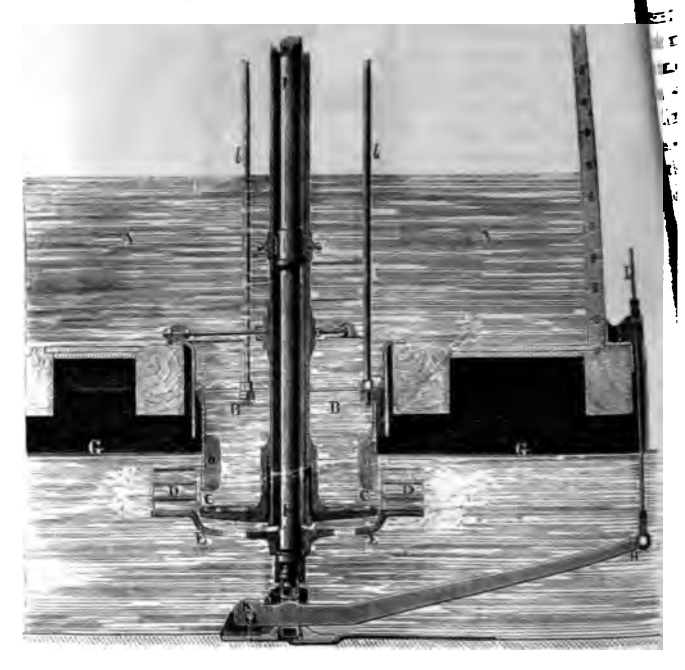


Fig. 448.

dont on vient de parler, de manière à se présenter partout sur le passage de la nappe d'eau qui s'en échappe. On se fera une idée nette de cette roue, en imaginant que ce soit la roue à aubes courbes de la *fig.* 443 (page 549) qu'on a placée horizontalement, après avoir enlevé les bras qui relient la couronne à l'arbre, afin que le bas du réservoir B puisse pénétrer à son intérieur. Une sorte de calotte de fonte E relie la roue à un arbre central F, qui s'élève verticalement, en passant à l'intérieur d'un tuyau disposé au milieu du réservoir B. La roue est tout entière plongée dans l'eau du bief d'aval, dont le niveau est en G. L'arbre F se termine inférieurement par un pivot, qui s'appuie sur un levier HK, mobile autour du point K. Une tige L, articulée à l'extrémité H du levier, se

[redacted]

à sa partie supérieure par une vis dans laquelle s'engage ı ; c'est en faisant tourner cet écrou, qui est d'ailleurs for- ›outenu par des pièces fixes, qu'on peut élever ou abaisser é l'arbre F, avec la roue qu'il porte, de manière à amener à être exactement en regard de l'ouverture C par laquelle ·t du réservoir B.

ıersion de la roue dans l'eau du bief inférieur n'empêche ı du réservoir B de sortir par l'ouverture C, pour venir agir ubes dont cette roue est munie sur tout son contour. L'é- nt se produit en vertu de la différence de niveau dans les fs. Si l'eau n'était pas dirigée dans son mouvement à l'in- lu réservoir B, les molécules liquides sortiraient par les s points de l'ouverture C, en se mouvant perpendiculaire- la surface latérale de ce réservoir. En pénétrant de cette à l'intérieur de la roue, elles agiraient bien sur les aubes , et leur communiqueraient un mouvement de rotation : erait difficile de disposer ces aubes de manière à satisfaire litions générales que doit remplir un bon moteur hydrau- 375). C'est pour cela que M. Fourneyron a disposé à l'in- lu réservoir B des cloisons , dont on voit la forme sur la , qui est une coupe horizon- e dans la machine à la hau- la roue. La courbure de ces est dirigée en sens contraire des aubes de la roue D. Il te que l'eau sort du réservoir e mouvant partout oblique- sa surface ; elle vient ainsi rer les aubes, qui s'opposent tinuation de son mouvement, :e sur elles, de tous côtés, des ıs qui font tourner la roue sens indiqué par la flèche.



Fig. 449.

vanne cylindrique *aa*, *fig.* 448, existe à l'intérieur du réser- sur tout son contour ; cette vanne est destinée à rétrécir moins l'ouverture C par laquelle l'eau sort de ce réser- ur se rendre dans la roue. A cet effet, elle peut être abaissée ée à volonté au moyen de trois tringles verticales *b*, *b*, à leur partie supérieure de filets de vis, dans lesquels ent des écrous qu'il suffit de faire tourner ensemble dans le ıvenable. Les bords inférieurs de cette vanne *aa* présen-



suite du mouvement de la roue, les aubes fuient
liquides : elles ne peuvent recevoir d'action de leur
de la vitesse relative que ces filets liquides possèd
elles (§ 327). Or, les aubes sont disposées de man
la turbine aura la vitesse qu'elle doit prendre h
vitesse relative de l'eau par rapport à la roue sc
la tangente à chaque aube menée par son extrém
résulte de là que l'eau entre dans la roue sans p
En se mouvant le long des aubes courbes, de l'i
rieur, elle exerce une pression en chaque point, en
sa vitesse change constamment de direction. En
roue avec une vitesse relative dirigée en sens con
ment des aubes ; et l'on conçoit que l'on puisse f
turbine un mouvement tel que la vitesse de
extérieure soit précisément égale à cette vitesse
condition est remplie, l'eau, à sa sortie de la rou
que d'un mouvement insensible, et viendra ainsi
au milieu de laquelle la roue est plongée ; elle
dire, déposée sans vitesse par les aubes, qui f
traîner.

On voit que la turbine Fourneyron satisfait a
roue Poncelet (§ 379) aux conditions générales i

Ajoutons à cela que, l'eau agissant en même temps sur toutes les aubes de la turbine, les pressions horizontales qu'elle exerce sur les aubes ne tendent à entraîner l'axe de la roue ni d'un côté ni de l'autre; et en conséquence ces pressions ne déterminent aucun frottement de l'arbre sur son pivot, ni sur les corps qu'il touche en divers points de sa hauteur, et qui sont destinés à le maintenir dans une position exactement verticale. Ces circonstances, qui n'auraient pas pu être réalisées dans une roue à axe horizontal, font que la turbine dont il s'agit donne de meilleurs résultats que la roue Poncelet. L'expérience a fait voir que cette turbine utilise les 0,75 du travail moteur que représente la quantité d'eau dépensée, et que même, dans certains cas, elle en utilise les 0,80.

La turbine Fourneyron présente encore d'autres avantages d'une grande importance, que nous allons indiquer. D'abord elle peut fonctionner au milieu de l'eau du bief d'aval, comme le montre la fig. 448. Il résulte de cette disposition, qui est généralement adoptée par M. Fourneyron, mais qui n'est pas indispensable : 1° que la machine fonctionne toujours, à l'époque des crues, comme au moment des basses eaux, sans qu'on ait à s'inquiéter de la hauteur plus ou moins grande du niveau de l'eau dans le bief d'aval; 2° que la totalité de la hauteur de chute est utilisée, ce qui n'aurait pas lieu si la roue devait être placée au-dessus du niveau de l'eau dans le bief d'aval; 3° enfin que la machine marche même au moment des fortes gelées, puisque l'eau ne passe à l'état de glace qu'à la surface des cours d'eau.

Un autre avantage de la turbine dont nous nous occupons, avantage qui a été constaté par des expériences nombreuses, consiste en ce qu'on peut faire varier sa vitesse dans des limites assez étendues, de part et d'autre de la vitesse qui correspond au maximum d'effet, sans que le rapport du travail utilisé au travail moteur que représente la quantité d'eau employée diminue beaucoup. Ce résultat a une très grande importance, pour les cas où une turbine doit marcher toujours avec la même vitesse, et où la hauteur de la chute d'eau motrice varie. En effet, la vitesse d'une turbine qui correspond au maximum d'effet dépend de la hauteur de la chute; elle augmente ou diminue en même temps que cette hauteur. Si la turbine marche toujours avec la même vitesse, sous des hauteurs de chute différentes, elle n'a pas constamment la vitesse capable de produire le maximum d'effet : il est donc très important que la machine, fonctionnant avec une vitesse différente de cette vitesse particulière, fournisse des résultats qui approchent beaucoup du maximum d'effet qu'on pourrait en obtenir.

Enfin la turbine Fourneyron peut être adaptée à toute espèce de chute, pourvu qu'on la dispose en conséquence, suivant la quantité d'eau plus ou moins grande qui doit agir sur elle, et la rapidité du mouvement qu'elle doit prendre. Pour qu'il ne reste pas de doute à ce sujet, il suffit de citer deux exemples. M. Fourneyron a établi à Saint-Blaise, dans la forêt Noire, une turbine qui est mise en mouvement par une chute de 108 mètres de hauteur; cette turbine, dont le diamètre n'est que de $0^m,55$, fait 2300 tours par minute, et a une force de 40 chevaux-vapeur: elle utilise les 0,75 de la force de la chute. D'un autre côté, dans des expériences faites sur une turbine établie à Gisors, on a trouvé que, sous une chute de $1^m,45$, la machine utilisait les 0,75 du travail développé par la chute; que sous une chute de 0,62, elle en utilisait les 0,66; et enfin que sous une chute de $0^m,34$, elle en utilisait encore les 0,60. Aucune des roues hydrauliques connues n'aurait pu produire d'aussi bons résultats, dans ces circonstances exceptionnelles.

§ 385. **Turbine Callon.**—Au milieu de tous les avantages que nous venons de signaler dans la turbine Fourneyron, il existe un inconvénient qui fait qu'elle n'utilise pas toujours une aussi grande portion du travail développé par la chute. Nous avons dit que l'ouverture par laquelle l'eau sort du réservoir, pour se rendre dans la roue, peut être rétrécie plus ou moins, dans le sens de la hauteur, au moyen d'une vanne cylindrique, qui règne tout autour du réservoir, et que l'on peut élever ou abaisser à volonté. On donne à cette vanne une position ou une autre, suivant qu'on a une quantité d'eau plus ou moins grande à dépenser. La nappe d'eau qui s'échappe du réservoir, sur tout son contour, pour pénétrer dans la roue, a donc une épaisseur plus ou moins grande, suivant les cas; et, en conséquence, elle ne remplit pas toujours la roue dans toute sa hauteur. La partie supérieure de l'espace compris entre les aubes de la roue ne reste cependant pas vide; mais l'eau qui s'y trouve ne possède pas la vitesse de celle qui sort du réservoir: et cela occasionne des remous, accompagnés de pertes de vitesse, qui déterminent une diminution dans l'effet utile. C'est pour cela que M. Fourneyron divise sa roue en plusieurs compartiments dans le sens de sa hauteur, au moyen de cloisons horizontales que l'on voit sur la *fig.* 448. Mais ces cloisons ne font pas disparaître complétement l'inconvénient qui vient d'être signalé.

M. Ch. Callon a imaginé un autre moyen de faire varier la quantité d'eau dépensée par la turbine. Ce moyen consiste à remplacer la vanne unique de M. Fourneyron par un grand nombre de vannes partielles, correspondant aux différentes portions de l'ouverture par

[redacted]

le l'eau passe du réservoir dans la roue. A l'aide de cette mo-
ion, on conçoit que l'on puisse diminuer la quantité d'eau qui
lu réservoir, sans diminuer l'épaisseur de la lame d'eau ; il
en effet, de fermer complétement quelques-unes des vannes
lles, prises régulièrement dans tout le contour du réservoir, et
sser les autres entièrement ouvertes. L'inconvénient qui se
ntait dans la turbine Fourneyron ne se rencontre plus dans
de M. Callon ; mais il est remplacé par un autre, qui consiste
que les diverses portions de la roue passent successivement
nt des vannes ouvertes et devant des vannes fermées. Au mo-
où l'intervalle de deux aubes arrive en regard d'une vanne
le, l'eau qui y est contenue, et qui est animée d'une vitesse
grande, ne peut continuer à se mouvoir qu'en produisant un
derrière elle, ce qui occasionne une diminution brusque dans
tesse, et par suite entraîne une perte de travail.

186. **Turbine Fontaine.**—M. Fontaine de Chartres a donné à
bine une disposition différente de celle qu'avait adoptée M. Four-
on. Au lieu de faire descendre l'eau motrice dans un cylindre qui
tre jusqu'au milieu de la roue, pour la faire sortir sur tout son
ur, et la faire marcher dans la roue, de l'intérieur à l'extérieur,
nagine de faire sortir l'eau du réservoir A, *fig.* 450, par une
rture annulaire BB pratiquée dans son fond, et de la faire
le haut en bas dans la roue CC, qui se trouve placée au-des-
de cette ouverture annulaire. La roue est reliée par une sorte
llotte de fonte EE, avec un arbre vertical FF auquel elle com-
que son mouvement de rotation. Cet arbre est creux, et enve-
un arbre GG qui est solidement appuyé au fond du bief infé-
. Ce dernier arbre ne tourne pas avec la roue ; mais il supporte
sur sa tête, qui forme crapaudine, un pivot fixé à l'arbre FF
roue. Par cette disposition, la turbine est pour ainsi dire
endue : et le pivot se trouvant hors de l'eau, on peut l'en-
nir facilement dans un état convenable pour éviter les frot-
nts et l'usure.

ouverture BB, par laquelle l'eau sort du réservoir, pour entrer
la roue, est divisée, dans tout son contour, en un grand
ore d'orifices distincts, par des cloisons courbes destinées à
er l'eau dans son mouvement. Chacun de ces orifices est muni
e vanne spéciale à l'aide de laquelle on peut le fermer plus ou
is. Une couronne *aa* réunit les extrémités supérieures des tiges
de ces diverses vannes ; cette couronne est d'ailleurs soute-
par des tringles *c*, *c*, à l'aide desquelles on peut la faire mon-
ou descendre, ce qui fait varier en même temps la grandeur

des ouvertures par lesquelles l'eau peut s'écouler. La f
montre la disposition des vannes *d*, *d*, qui sont arrondi
éviter les pertes de vitesse dues aux changements brus
direction des filets liquides ; *e*, *e*, sont les cloisons courbes
gent l'eau à sa sortie ; *f*, *f*, sont les aubes de la turbine,
également courbes, mais dirigées en sens contraire des
directrices *e*, *e*.

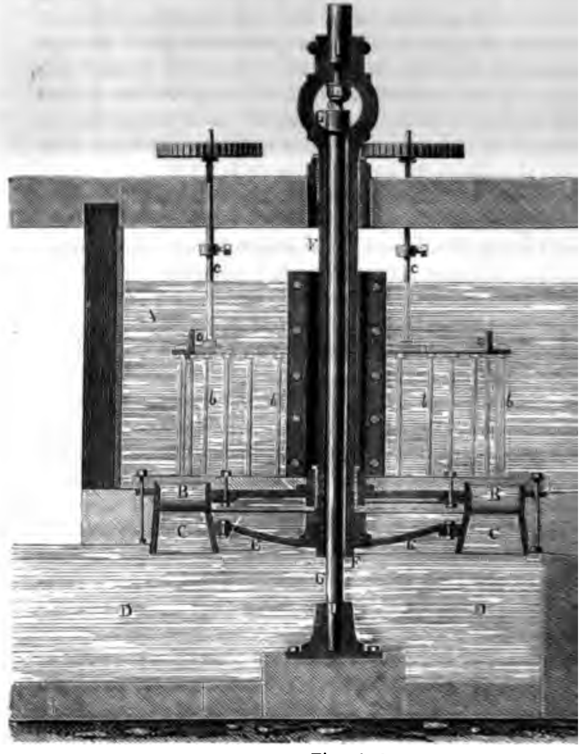


Fig. 450.

La disposition que M. Fontaine a donnée à ses vanne
paraître en grande partie l'inconvénient que nous avons si
la turbine Fourneyron, et qui fait que le rendement de

[redacted]

›n ne lui fournit pas toute l'eau qu'elle est capable
deux espèces de turbines donnent d'ailleurs d'aussi
une que l'autre, lors-
ɩont suffisamment ou-

ıne Kœchlin.— Les
ous venons de parler
ıne manière incom-
ɛparations qu'on peut
'n ne peut atteindre la
que, par un moyen
ɛst parvenu à abaisser
niveau de l'eau dans
soit que la roue soit
nmergée dans ce bief,
trouve au-dessus de
ıis à une petite dis-
ı on établit ordinaire-
ı momentané, qui isole
ɛ bief où se trouve la
'este du cours d'eau;
ıt au moyen de pom-
'eau qui y est conte-

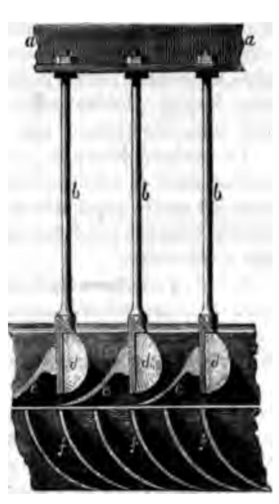


Fig. 451.

œchlin, qui a été imaginée par M. Jonval, et qui a
t perfectionnée par MM. A. Kœchlin de Mulhouse,
sposition particulière, qui a pour objet de faire dis-
cultés de visites et de réparations que nous venons
s les autres turbines. Voici quel en est le principe.
'eau soit amenée du bief d'amont dans le bief d'aval
vertical qui débouche dans l'un et dans l'autre de ces
ɔourra utiliser le travail développé par le passage de
'lindre, en installant à sa partie inférieure une tur-
celles que nous avons décrites. Mais, au lieu de
e au bas de cette chute, on peut aussi l'installer en
nque de la hauteur du cylindre, pourvu que l'eau,
ɔue, et parcourant ensuite la portion de ce cylindre
elle et le bief d'aval, ne soit mise en communica-
ɛc l'atmosphère qu'après qu'elle est arrivée dans le
ɔn effet, que si l'on perd de la force en plaçant la
ıt, en raison de ce que la hauteur du niveau du bief
us de la roue est plus petite, d'un autre côté, on en

gagne par l'aspiration qui se produit dans la partie du cyli
au-dessous de la roue, aspiration qui est d'autant plus f
roue est à une plus grande distance du niveau de l'eau d
d'aval. On comprend maintenant que la position que l'o
ainsi à la machine permettra de la visiter et de la réparer
plus facilement ; car il suffira de ne plus laisser arriver
trice dans le cylindre qui contient la turbine, pour que ce
vide complétement, et que la roue soit ainsi mise à sec.

La turbine Kœchlin, dans laquelle l'eau agit de ha
comme dans la turbine Fontaine, et non horizontalem
dans les autres machines de ce genre, fournit d'ailleurs d
résultats, lorsqu'elle fonctionne dans les circonstances pou
elle a été établie.

§ 388. **Turbines hydropneumatiques.**—Nous av
les avantages que présentent les turbines de pouvoir ma
l'eau, avantages dont le plus important est d'utiliser la
la hauteur de chute, quels que soient les changements
du niveau d'aval. Mais nous avons vu qu'il en résulte u
nient notable, dans le cas où la turbine ne dépense pas
pour laquelle elle a été construite. Si l'eau sort du ré
fois par tous les orifices, que l'on rétrécit plus ou moi
la quantité d'eau à dépenser, comme dans les turbines
et Fontaine, elle ne remplit pas tout l'espace compri
aubes de la roue ; le reste de cet espace est occupé par
bief d'aval, qui ne fait que tourner avec la roue, et
sence occasionne des remous accompagnés de pertes d
un certain nombre des orifices de sortie du réservoir
més, tandis que les autres sont restés entièrement ouv
dans la turbine Callon, l'intervalle des aubes de la rou
bien complétement lorsqu'il passe devant un orifice
lorsque cet intervalle, en tournant, vient à passer deva
fermé, l'eau y éprouve un ralentissement brusque,
vide que son mouvement tend à produire derrière elle
vénients ne se présenteraient pas si la turbine marc
l'eau, et si elle était disposée de manière que l'inter
aubes ne fût jamais complétement rempli par l'eau q
duit successivement ; le reste de cet espace serait oc
l'air, qui communiquerait librement avec l'air extérieu
présence ne gênerait en rien la marche de l'eau dans
des aubes courbes.

Pour réunir à la fois les avantages de la marche s
ceux de la marche dans l'air, M. L.-D. Girard a eu

les turbines dans l'air comprimé. Concevons qu'une tur-
installée au-dessous du niveau d'aval, et qu'elle soit
ent recouverte d'une espèce de cloche qui plonge dans
dont les bords se trouvent un peu plus bas que la partie
de la roue. Si l'on foule de l'air dans cette cloche, le
l'eau s'y abaissera de plus en plus ; mais à partir du mo-
ce niveau se sera abaissé jusqu'aux bords de la cloche, les
quantités d'air introduites ne le feront pas baisser davan-
r excédant s'échappera par le bas de la cloche, et remontera
nosphère en traversant l'eau du bief d'aval. A l'aide de
position, la roue ne sera pas noyée ; elle se trouvera à
distance au-dessus du niveau de l'eau environnante, et
oujours placée de même par rapport à ce niveau, quelle
a hauteur de l'eau dans le bief d'aval. Tel est le principe
nes hydropneumatiques.
end facilement compte de la manière dont l'eau agit dans
lle turbine, en se reportant à ce qui a été dit sur l'écou-
un liquide par un orifice, lorsque la pression est plus
l'orifice que sur la surface libre du liquide dans le réser-
39). Si le niveau du bief d'aval est situé à 3 décimètres
des bords de la cloche qui contient la turbine, l'excès de
n de l'air renfermé dans cette cloche sur l'air extérieur
ré par une colonne d'eau de 3 décimètres de hauteur.
oulement de l'eau du réservoir dans la turbine, et par
t dans l'air comprimé de la cloche, s'effectuera de la
nière que si cet air n'était pas comprimé, et que le niveau de
bief d'amont fût plus bas de 3 décimètres. Ainsi l'écoule-
quide sera toujours dû à la hauteur de chute, c'est-à-dire
nce de niveau des biefs d'amont et d'aval. L'emploi de la
ir comprimé amène donc le même résultat que si, en lais-
ue où elle est installée, on abaissait à la fois les biefs
t d'aval d'une même quantité, de manière à placer le
dernier à être immédiatement au-dessous de la roue. On
là qu'une turbine hydropneumatique réunit l'avantage de
dans l'air à celui d'utiliser autant que possible la totalité
teur de chute.
construction des turbines hydropneumatiques, on n'a pas
dopter des dimensions telles que l'intervalle des aubes de la
complétement plein de liquide, lorsque la turbine dépense
ande quantité d'eau qu'on puisse lui donner. Il vaut même
'une partie de cet intervalle soit toujours occupée par de
uniquant librement avec l'air environnant, et que l'eau ne

fasse que s'étaler en nappe dans la concavité de chaque aube. C'est ce qui fait que, lorsqu'on n'a qu'une petite quantité d'eau à dépenser, on peut donner à la roue des dimensions plus grandes que celles qu'on lui aurait données sans cela, et que, par conséquent, on peut la faire tourner moins rapidement, ce qui est un avantage réel. L'emploi des vannes partielles de M. Ch. Callon, appliquées soit aux turbines Fourneyron, soit aux turbines Fontaine, est alors préférable à la disposition qui consiste à rétrécir plus ou moins les orifices par lesquels l'eau passe du réservoir dans la roue en n'en fermant aucun complétement. L'expérience a prouvé que les turbines établies de cette manière utilisent sensiblement la même fraction de la force de la chute (0,75), quelle que soit la quantité d'eau dépensée, ce qui est un résultat des plus importants.

Il ne reste plus qu'à indiquer de quelle manière on maintient une atmosphère d'air comprimé dans la cloche qui recouvre la roue. On y parvient au moyen d'une pompe foulante à air, que la turbine elle-même fait mouvoir pendant tout le temps qu'elle marche. Les nouvelles quantités d'air introduites ainsi constamment dans la cloche compensent les pertes qui proviennent, soit des fuites qui peuvent exister, soit de ce que l'eau entraîne de l'air avec elle; mais la pompe en fournit toujours un excès qui s'échappe en passant sous les bords de la cloche, de sorte qu'on est sûr que le niveau de l'eau près de la turbine correspond toujours à ces bords.

M. Girard a proposé d'appliquer le même système aux roues hydrauliques à axe horizontal, afin de les empêcher d'être noyées au moment des crues.

§ 389. **Considérations générales sur l'établissement d'une roue hydraulique.** — Lorsqu'on veut établir une roue hydraulique, pour utiliser la force d'une chute d'eau, il faut d'abord choisir, parmi les diverses espèces de roues, celle qui convient le mieux aux circonstances dans lesquelles on est placé. Des raisons de diverses natures peuvent entrer en considération pour le choix qu'on a à faire. La simplicité plus ou moins grande de la roue et des constructions que nécessitera son établissement; la facilité des réparations qu'on a besoin de faire de temps en temps à des machines de ce genre; la nature de la chute, et les variations que sa force éprouve aux diverses époques de l'année; le besoin plus ou moins grand qu'on a d'utiliser le mieux possible la force de cette chute, sont autant de motifs qui conduiront à faire adopter tel ou tel système de moteur.

Lorsqu'on aura fait son choix, on saura quelle fraction de la force de la chute sera utilisée par la roue qu'on aura adoptée. Ce

exemple, les 0,75 de cette force, s'il s'agit d'une roue à d'une turbine; ou les 0,56, si c'est une roue en dessous ›urbes; ou bien encore les 0,25, si c'est une roue en des- ›es planes.

rra donc, d'après la connaissance qu'on a de la force de :alculer le nombre de chevaux-vapeur qui représentera la ı roue, et régler d'après cela le nombre et les dimensions nes spéciales destinées à la production du travail utile, ma- i seront, ou des pompes destinées à élever de l'eau à une auteur, ou des moulins à farine, ou des métiers à filer, etc. on aura besoin d'emprunter à l'expérience la connaissance tité de chacun de ces travaux qui peut être effectué par un cheval-vapeur.

teur de la chute, et la nature de la roue qu'on adopte. nt le nombre de tours que cette roue doit faire dans un né pour produire le maximum d'effet. On devra, en consé- :ablir entre l'arbre de la roue et les mécanismes qu'elle mouvoir une liaison telle que ces mécanismes marchent esse la plus convenable au travail qu'ils effectuent, lorsque endra ce mouvement particulier qui lui permet d'utiliser ınde fraction possible du travail développé par la chute. ira, pour cela, soit d'engrenages (§ 59), soit de courroies 58).

d'après la connaissance de la vitesse que doit prendre la › la quantité d'eau que lui fournira la chute dans un temps déterminera les dimensions des aubes ou augets sur les- quide doit agir.

e la roue sera construite et installée, et qu'elle aura été mmunication avec les machines spéciales qu'elle doit faire l ne s'agira plus que d'ouvrir les vannes qui permettent à ice de sortir du bief supérieur, pour qu'elle vienne exercer sur la roue, et la mettre en mouvement. Si l'on donne à e quantité d'eau de plus en plus grande, il est clair qu'elle u mouvement de plus en plus rapide. On conçoit donc uisse de cette manière lui donner la vitesse qui convient imum d'effet; et, si les données d'expériences sur les- s'est fondé pour son établissement sont bien exactes, on enser ainsi précisément la quantité d'eau que la chute est › fournir sans interruption.

Machine à colonne d'eau à simple effet. — Les roues ıes sont les machines dont on se sert dans la plupart des *tiliser la force* d'une chute d'eau; cependant il y a des

circonstances exceptionnelles dans lesquelles on a recours à d'autres moyens. Lorsqu'on a à sa disposition une chute d'une grande hauteur, qui ne fournit qu'une petite quantité d'eau, on peut profiter de cette chute pour donner un mouvement de va-et-vient à un piston qui se meut dans un corps de pompe ; ce mouvement de va-et-vient, en se transmettant ensuite à divers mécanismes, déterminera la production d'une certaine quantité de travail utile.

Les machines motrices, dans lesquelles la force de l'eau est ainsi appliquée à un piston, qui, en raison de cette action, se meut tantôt dans un sens, tantôt dans l'autre, sont désignées sous le nom de *machines à colonne d'eau*. La machine est *à simple effet*, lorsque l'eau ne fait mouvoir le piston que dans un sens, et que son mouvement en sens contraire est déterminé par son propre poids ou par le poids des diverses pièces qui lui sont fixées ; elle est *à double effet*, lorsque l'eau agit constamment sur le piston, soit pour le pousser dans un sens, soit pour le faire mouvoir en sens contraire.

Nous prendrons pour exemple de machine à colonne d'eau à simple effet, les belles machines que M. Juncker a établies dans la mine de Huelgoat, en Bretagne. La *fig*. 452 en est une coupe qui montre tous les détails de leur disposition. Un piston A est installé dans un cylindre BB qu'il peut parcourir dans toute sa longueur. Ce cylindre est ouvert par le haut et fermé par le bas ; son fond est traversé par la tige du piston A. L'eau qui doit faire mouvoir la machine, et qui doit agir sur le piston A par la pression due à la hauteur de la chute, est amenée par un tuyau C, qui part du réservoir supérieur, et vient aboutir à la machine même. Une ouverture D, pratiquée au bas du cylindre BB, permet à l'eau motrice de pénétrer dans ce cylindre, de presser le piston A de bas en haut, et de le faire monter à l'intérieur du cylindre ; cette même ouverture laisse écouler l'eau contenue dans le cylindre BB, et par suite permet au piston A de descendre, lorsqu'on supprime sa communication avec le tuyau C, et qu'on la fait communiquer librement avec l'atmosphère.

Pour que le piston A puisse prendre un mouvement de va-et-vient dans le cylindre BB, il faut donc que l'ouverture D soit alternativement mise en communication avec le tuyau des eaux motrices C et avec l'atmosphère ; c'est à cela qu'est destiné l'appareil régulateur que l'on voit à gauche du cylindre BB. Cet appareil se compose essentiellement de deux pistons E, F, montés sur une même tige, et pouvant se mouvoir ensemble dans le cylindre qui les contient. Ces deux pistons occupent, sur la fig. 452, la position la plus basse qu'ils

...issent prendre ; la *fig.* 453, qui reproduit l'appareil régulateur ...ul, les montre au contraire dans leur position la plus élevée. Dans ...ne ou dans l'autre de ces deux positions, l'eau motrice, qui vient ...r le tuyau C, communique toujours avec l'espace compris entre ...s deux pistons E, F. Mais dans la première, *fig.* 452, le piston E ...t au-dessous de l'ouverture D, et par conséquent l'eau motrice ...eut venir presser le piston A et le faire monter ; tandis que dans ...a seconde, *fig.* 453, le piston E intercepte le passage de l'eau mo-...rice, et permet, au contraire, à l'eau qui s'est introduite sous le ...piston A, en le soulevant, de s'écouler par le tuyau de décharge G, ...t de laisser redescendre le piston. Reste donc à faire voir com-...ment les deux pistons E, F, reçoivent un mouvement de va-et-vient, en vertu duquel l'ouverture D est alternativement en communication avec le tuyau C et avec le tuyau G.

Le piston F est un peu plus large que le piston E. L'eau motrice, qui arrive toujours librement entre eux, exerce donc une plus grande pression sur la face inférieure du premier que sur la face supérieure du second ; et, en conséquence, les deux pistons tendent constamment à monter, en vertu de la différence de ces deux pressions. C'est ce qui arrive en effet, tant qu'une autre action ne vient pas se combiner avec celles que nous venons de signaler, et c'est ainsi que les pistons E, F, passent de la position indiquée par la *fig.* 452 à celle de la *fig.* 453. Pour produire le mouvement contraire, on a adapté au cylindre dans lequel se meuvent les pistons E, F, un petit tuyau H, qui se relève, et communique avec le dessus du piston F, par la petite ouverture I. L'eau motrice, en passant par ces conduits, vient exercer sa pression sur la tête du piston F : et, pour que la pression ainsi produite ne soit pas trop grande, on a surmonté le piston F d'un manchon cylindrique qui traverse le fond supérieur du cylindre ; en sorte que l'eau amenée par l'ouverture I ne presse ce piston que sur la surface annulaire qui entoure ce manchon. Un mécanisme particulier, dont nous allons parler, met l'ouverture I alternativement en communication avec le tuyau H qui amène l'eau motrice, et avec le tuyau MM qui aboutit au tuyau de décharge G. Dans le premier cas, la pression que l'eau motrice exerce sur la face supérieure du piston F, tout autour du manchon qui le surmonte, l'emporte sur la résultante des pressions que cette même eau exerce sur la face inférieure du piston F et sur la face supérieure du piston E ; et ces deux pistons descendent. Dans le second cas, l'eau qui se trouve au-dessus du piston F communiquant avec le tuyau de décharge G, la différence des pressions de l'eau motrice sur la face inférieure du piston F et sur

la face supérieure du piston E fait remonter ces deux pistons.
Deux petits pistons K, L, se trouvent dans un petit cylindre situé

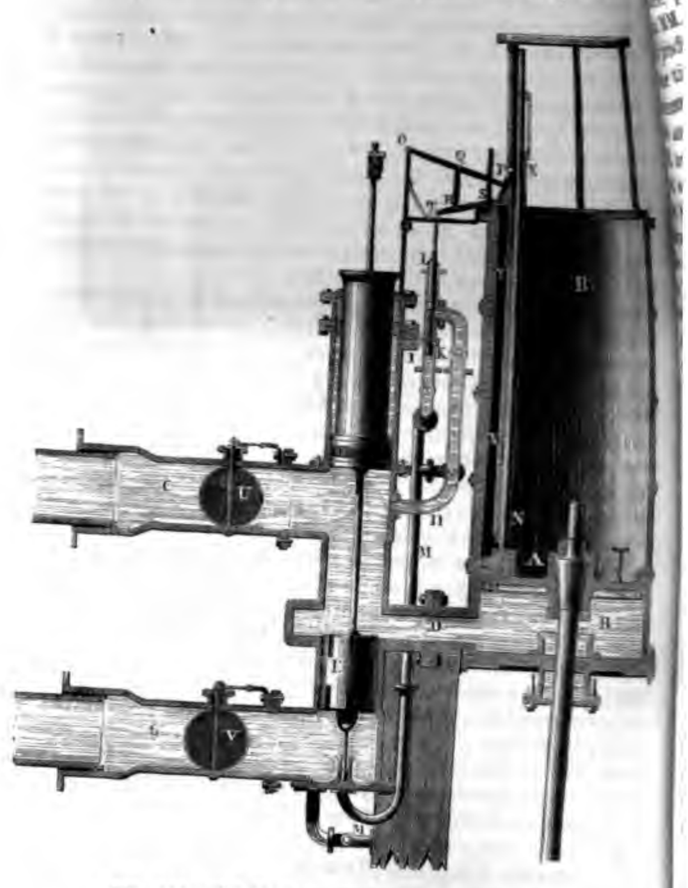


Fig. 452. (*Échelle de 22 millimètres pour mètre.*)

entre le tuyau H et l'ouverture I. Un mouvement de va-et-vient de ces deux pistons amène le piston K, tantôt au-dessous de l'ouver-

[redacted]

2, tantôt au-dessus de cette ouverture, *fig.* 453 ; et communiquer le dessus du piston F, soit avec l'eau tuyau H, soit avec le tuyau de décharge, par le con- nouvement de va-et-vient des petits pistons K, L, r le piston A lui-même. A cet effet il est surmonté , qui agit, à la fin de chaque course ascendante ou sur un levier OP, mo- point O. Une tringle en Q à ce levier, trans- ement à un second le- le autour du point S, articulée en R. La tige ns K, L, est articulée nité de ce levier ST. Le mine par un arc P, qui ites cames à ses extré- NN, qui monte et des- piston A, est d'ailleurs ux petits taquets X, Y, sa face antérieure, l'au- postérieure ; ces taquets un à son tour, rencon- cames de l'arc P, et n mouvement les deux T, et les pistons K, L. montre la machine dans 'occupent les diverses it que le piston A monte de l'eau motrice ; les , sont au bas de leur notrice, en arrivant par par l'ouverture I, presse érieure du piston F, et i les deux pistons E, F, bas de leur course ; le donc soumis à l'action d'eau qui arrive libre- D, et il s'élève tant que les pistons E, F, ne chan- lace. Lorsque le piston L arrive vers le haut de sa uet X saisit la came que porte l'extrémité supérieure soulève cet arc, en faisant tourner le levier OP autour e levier ST tourne en même temps autour du point

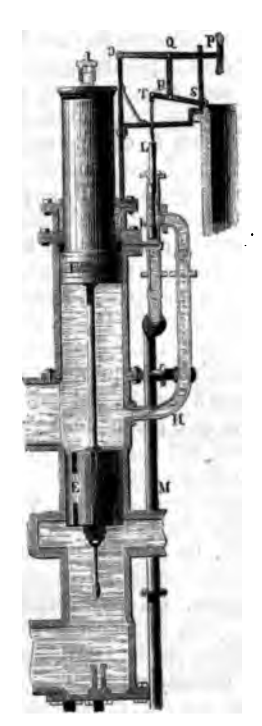


Fig. 453.



OP dans la position qu'il occupait d'abord, *fig.* 45
L, sont ainsi ramenés en même temps au bas
L'eau motrice, pouvant passer de H en I, vient
du piston F, et détermine l'abaissement des de
le tuyau C est donc de nouveau mis en comm
bas du cylindre BB, le piston A remonte, et ai
voit donc que, dès le moment que la machine a
mouvoir, elle se suffit à elle-même, et continu
marcher, sans qu'on ait besoin de s'en occupe

Pour modérer la marche de la machine, on a
papes à gorge U, V, dans les tuyaux C, G.
soupapes d'une quantité plus ou moins grande
étranglements qui ralentissent la marche du pisto
lorsqu'il monte, soit lorsqu'il descend, et l'on p
sorte qu'il prenne telle vitesse que l'on veut. Les
donne aux taquets X, Y, sur la tige NN, règlent
due de la course du piston. Pour arrêter la mac
fermer deux robinets qui sont installés, l'un
l'autre sur le tuyau M; cette simple opération fa
E, F, ne peuvent plus ni monter ni descendre
l'endroit où ils se trouvent au moment où l'on
robinets. On peut même reconnaître sans pein

ce commence par communiquer avec cette ouverture .nelures supérieures ; le passage qui est ainsi offert à ,'agrandit de plus en plus, en raison de ce que la pro- ›s cannelures va en augmentant depuis leur origine jus- se du piston : en sorte que la communication de l'eau .vec l'ouverture D s'établit ainsi progressivement jusqu'à ette ouverture soit complétement démasquée. Il en est de ›ur la communication de l'ouverture D avec le tuyau de e, lorsque le piston E remonte.

jue le piston E passe devant l'ouverture D, il éprouve une ession latérale de la part de l'eau qui y est contenue. Pour tte pression ne l'applique pas fortement contre la paroi du :e dans lequel il se meut, ce qui donnerait lieu à un frotte- :onsidérable, on a évidé ce cylindre, dans tout son contour, ;ard de l'ouverture D. De cette manière, l'eau contenue en D end librement tout autour du piston E ; elle exerce égale- sa pression sur tout son contour, et il en résulte qu'il n'est ré ni d'un côté ni de l'autre sur la paroi du cylindre dans l il est engagé : il se meut sans éprouver plus de frottement :ette paroi que s'il n'était pas soumis à la pression dont nous ns.

ux machines, entièrement pareilles à celle que nous venons crire, sont installées l'une à côté de l'autre, dans la mine de ɔ argentifère de Huelgoat. Elles sont mises en mouvement ne chute d'eau de 60 mètres de hauteur. Le piston moteur A acune d'elles est lié à une longue tige qui traverse le fond lindre BB, et descend verticalement dans un puits, pour y mouvoir une pompe d'épuisement. Cette pompe élève d'un jet l'eau du puits à une hauteur verticale de 230 mètres. lorsque le piston A monte dans le cylindre BB, que l'eau de ne est refoulée par la pompe dans le tuyau d'ascension, à cette ur prodigieuse. Pendant que ce piston moteur redescend, avec gue tige qui le relie au piston de la pompe d'épuisement, aucune résistance utile à vaincre ; aussi a-t-on employé un n particulier pour équilibrer en grande partie le poids de tout ppareil, afin d'éviter la trop grande rapidité de sa descente, inconvénients graves qu'elle aurait pu entraîner. Au lieu de r le cylindre BB au niveau de la galerie souterraine par lle devaient s'écouler les eaux provenant de la pompe d'épui- nt et du tuyau de décharge G, on l'a installé à 14 mètres en e-bas de cette galerie. La hauteur de la colonne d'eau motrice uve donc portée ainsi à 74 mètres ; et l'eau, après avo

soulevé le piston moteur A, ne peut être expulsée pa
cylindre BB, pendant qu'il descend, qu'autant qu'il l'a fai
ter à une hauteur de 14 mètres, par le tuyau de décharge
élévation de l'eau qui a agi dans la machine est une résist
le piston doit vaincre en descendant, et qui a été ca
manière à modérer convenablement son mouvement. Ell
pas être assimilée à une résistance entièrement inutile,
celle déterminée par une soupape à gorge, qui rétréc
moins le passage de l'eau, et diminue ainsi sa vitesse
emploi a donné lieu à une augmentation correspondant
puissance de la colonne d'eau motrice.

Les belles machines de Huelgoat, qui fonctionnent
douceur et une régularité parfaites, utilisent près des
du travail moteur développé par la chute.

§ 391. **Machine à colonne d'eau à double e**
disposition de la machine à colonne d'eau à double ef
coup d'analogie avec celle de la machine à simple effe
de différence essentielle qu'en ce que le piston A,
meut dans un cylindre BB fermé à ses deux extrémit
que l'appareil régulateur, au lieu de ne faire communi
nativement le tuyau de l'eau motrice et le tuyau de déch
le bas du cylindre, établit ces communications altern
fois avec la partie supérieure et avec la partie inférie
ouvertures C, D. C'est par le tuyau vertical E qu'arri
trice : ce tuyau s'embranche avec deux tuyaux F, G,
mier amène l'eau à l'ouverture C, et le second à l'o
Deux pistons H, K, fixés à une même tige, peuvent
dans un petit cylindre placé à côté du cylindre princip
la position actuelle de ces deux pistons, l'eau motrice
la partie inférieure du cylindre BB, en passant par le
par l'ouverture D ; elle exerce donc sur la face inférieu
A une pression qui est dirigée de bas en haut. En même
qui se trouve au-dessus du piston A communique lib
l'ouverture C, avec le tuyau de décharge L. Le piston A
pressé sur sa face inférieure que sur sa face supérieur
mouvement ascendant ; l'eau qui le surmonte sort par
et tombe dans une caisse M, qui communique avec le ca
à son écoulement. Concevons maintenant qu'au moment
A atteint l'extrémité supérieure du cylindre BB, les d
H, K, s'abaissent, de manière à se placer respectivem
sous des ouvertures C, D ; l'ouverture C communique
motrice, par le tuyau F, et l'ouverture D avec le tuya

piston A redescendra donc, en faisant sortir par ce tuyau de
ge toute l'eau qui s'était introduite sous lui. Si les pistons

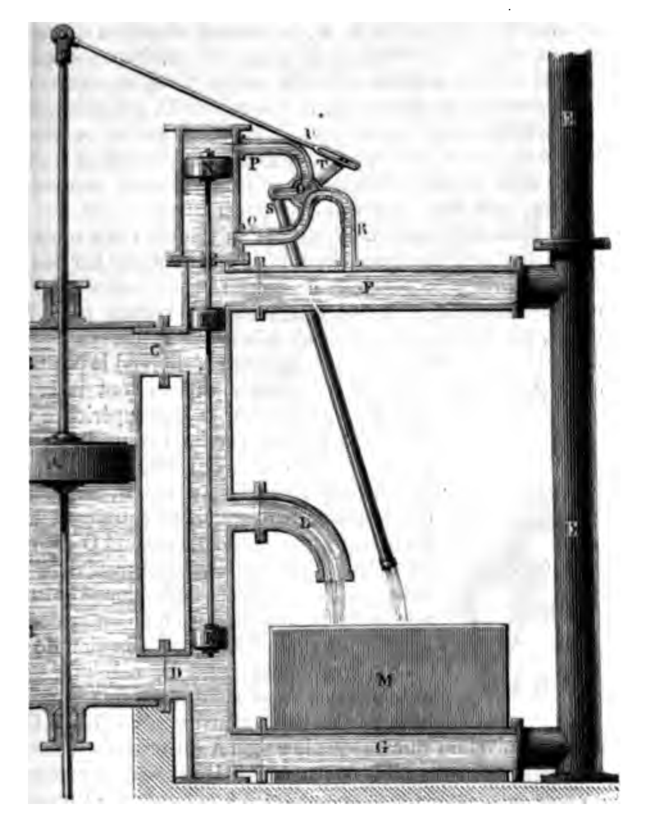
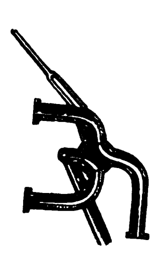


Fig. 454.

, reprennent leur première position, lorsque le piston A sera
au bas de sa course, l'eau motrice, agissant par l'ouverture
fera remonter ; et ainsi de suite.
voit donc que, pour établir alternativement les communica-
des ouvertures C, D, avec le tuyau de l'eau motrice E, et avec

le tuyau de décharge L, il suffit de faire descendre les d
H, K, lorsque le piston A est au haut de sa course, et
remonter, lorsqu'il est arrivé au bas. Ce mouvement a
intermittent des pistons H, K, est produit au moyen d'
qui est adapté à l'extrémité de la tige de ces deux pist
peut se mouvoir dans un cylindre spécial placé au-dess
où se trouvent les pistons H, K. Un robinet O, qui pren
sitions différentes, suivant que le piston A arrive au
bas de sa course, fait communiquer alternativement la
rieure et la partie supérieure de ce petit cylindre, soit
motrice, soit avec l'atmosphère, par l'intermédiaire
P, Q. Dans la position indiquée par la figure, l'eau m
arrive toujours librement dans le tuyau F, passe par
R, Q, et presse le piston N de bas en haut ; tandis q
est au-dessus de ce piston communique librement av
phère, par le tuyau S, qui vient déboucher au-dessus
M. Si le robinet O tourne d'un angle droit, il prend la p
quée par la *fig.* 455, et les communications sont i
l'eau motrice agit sur la face supérie
ton N, en passant par les tuyaux R,
qui est au-dessous de ce piston comm
l'atmosphère, par les tuyaux Q, S :
que le piston N descend, en entraîna
les deux pistons H, K. Le robinet O
l'une de ses extrémités, d'une maniv
le bouton s'engage dans l'œil allongé
une bielle U, articulée à un prolong
tige du piston A. Tant que le bouto
nivelle T se trouve entre les extrém
œil, le piston A se meut, sans que l
prenne le moindre mouvement ; la bi


Fig. 455.

sur la manivelle T que lorsque le piston A est près d'att
ou l'autre des extrémités de sa course. Il est aisé de c
d'après cela, que la machine se suffit à elle-même, et
marcher ainsi indéfiniment, sans qu'on ait besoin de s
tant qu'il arrivera par le tuyau E de l'eau capable de
sa pression les résistances appliquées au piston A.

§ 392. **Bélier hydraulique.** — Nous avons dit (§ 3
d'une chute agissait quelquefois d'elle-même, sans in
pour produire du travail utile : nous allons en voir un
marquable dans le bélier hydraulique. Cette machine
inventée par Montgolfier, en 1796, a pour objet de

[redacted]

une chute d'eau, pour élever une portion de l'eau fournie par à un niveau supérieur à celui du bief d'amont.
inons que l'eau de la chute dont on dispose ne puisse s'écou- par un tuyau d'une certaine longueur, qui débouche au la hauteur de chute. Lorsque ce tuyau sera ouvert à son ité inférieure, l'eau s'écoulera en prenant une vitesse qui ra à la fois de la hauteur de chute et des frottements occa- par son mouvement dans le tuyau. L'écoulement étant si l'on vient tout à coup à fermer l'orifice de sortie du tuyau, eau contenue à son intérieur sera obligée de s'arrêter brus- it; mais cela ne se fera pas sans que cette masse d'eau une pression énorme sur les parois qui la renferment. Con- maintenant qu'un tuyau d'ascension s'embranche sur le l'écoulement dont nous venons de parler, et que l'extrémité ire de ce tuyau d'ascension soit fermée par une soupape nt de bas en haut. Au moment où la colonne d'eau en mou- sera brusquement arrêtée, elle ouvrira la soupape, et s'élan- ins le tuyau d'ascension, où elle montera jusqu'à une cer- iuteur. Si l'on recommence à produire le mouvement de ins le tuyau d'écoulement, et à l'arrêter tout à coup en fer- orifice, le liquide ouvrira de nouveau la soupape du tuyau sion, pour passer en partie dans ce tuyau, où le niveau a en conséquence. En répétant successivement la même on, on pourra déterminer ainsi l'élévation de l'eau dans le ascension, à une hauteur beaucoup plus grande que la hau- chute; et, si ce tuyau aboutit à un réservoir supérieur, on emplir le réservoir, en opérant comme nous venons de le endant un temps suffisamment long. Tel est le principe du ydraulique. Voyons maintenant quelle est la disposition que nnée Montgolfier, et d'après laquelle il fonctionne seul, sans it besoin de s'en occuper.
ig. 456 est une coupe d'un bélier hydraulique qui existe au u de la Celle-Saint-Cloud, près Paris, et qui y a été établi ntgolfier lui-même, pour l'élévation de l'eau nécessaire aux s du château. L'eau d'une pièce d'eau, située à un niveau ur, et alimentée par des sources, est amenée par le tuyau A. u présente une ouverture tournée vers le haut, par laquelle 'écoule. Une soupape B est suspendue par sa tige à une l'étrier qui surmonte cette ouverture, et se trouve ainsi sur min du liquide, qui passe tout autour d'elle pour sortir. A du moment où l'écoulement commence, la vitesse de l'eau augmentant; il en résulte que la soupape B éprouve de bas

en haut, de la part du liquide, une pression de plus en plus grande ; bientôt cette pression suffit pour la soulever, et elle vient s'applique contre les bords de l'orifice, qu'elle ferme complétement. Alors toute la masse d'eau contenue dans le tuyau A, se trouvant animée d'un vitesse un peu grande, et ne pouvant plus sortir par cet orifice

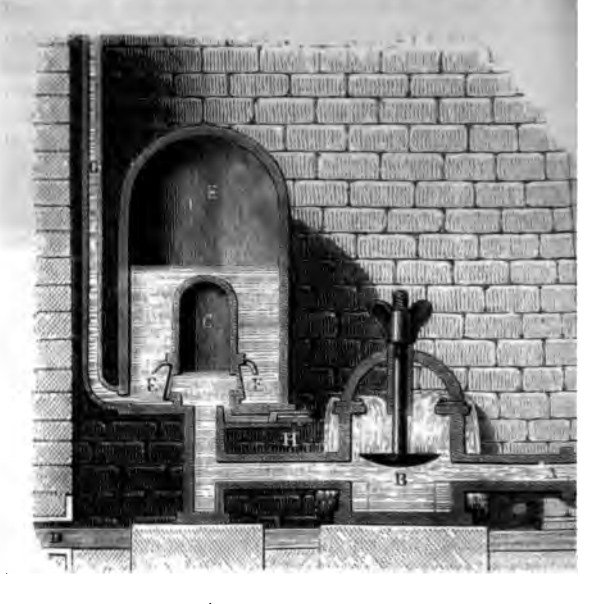


Fig. 456. (*Échelle de 12 centimètres pour mètre.*)

exerce une pression considérable sur toutes les parties des qui la contiennent ; cette pression ouvre les soupapes E, certaine quantité d'eau, traversant ces soupapes, se rend ain un réservoir qui les enveloppe, et d'où elle passe dans un d'ascension G. Au bout d'un temps très court, toute la vit l'eau contenue dans le tuyau A est anéantie ; les soupapes E ferment ; la soupape B, qui n'éprouve plus une aussi grand sion sur sa face inférieure, retombe dans sa position primit le jeu de la machine recommence comme précédemment. qui sort du tuyau A, pendant tout le temps que la soupape

ouverte, tombe sur le sol environnant, et s'écoule au dehors par le tuyau D.

Le tuyau A se relève à son extrémité de gauche, pour aboutir à une capacité C au bas de laquelle sont les soupapes E, E. Cette capacité contient de l'air à sa partie supérieure. La pression de cet air joue un grand rôle dans la marche de la machine. Lorsque l'écoulement de l'eau est brusquement arrêté par la fermeture de la soupape B, si le liquide ne se trouvait en contact qu'avec des parois solides, il se produirait un choc assez violent; et c'est en vertu de ce choc que les soupapes E, E s'ouvriraient, pour livrer passage à une certaine quantité d'eau. L'air contenu en C fait disparaître ce choc presque complétement, ce qui empêche l'appareil de se détériorer aussi promptement, et donne lieu en même temps à la production d'une plus grande quantité de travail utile. Au moment où l'eau ne peut plus s'écouler au dehors, elle comprime l'air, et perd ainsi peu à peu sa vitesse; en même temps la pression exercée par l'eau de tous côtés va en augmentant. Lorsque la vitesse de l'eau est complétement anéantie, l'air réagit pour reprendre son volume primitif; il repousse l'eau, qui rétrograde dans le tuyau A, et la pression diminue. Pendant ce temps les soupapes E, E restent ouvertes, tant que la pression qu'elles éprouvent de dedans en dehors surpasse celle qui est constamment exercée sur leurs faces extérieures, et elles livrent ainsi passage à une portion du liquide. Le mouvement rétrograde que prend l'eau dans le tuyau A, et qui est produit par la réaction de l'air contenu en C, ne cesse pas au moment où la pression s'est réduite à celle qui est due à la hauteur de la chute; l'eau continue à se mouvoir, en vertu de sa vitesse acquise; la pression continue donc aussi à décroître, et devient même inférieure à la pression atmosphérique. Cette espèce d'aspiration intérieure fait tomber la soupape B, et l'eau recommence à sortir comme précédemment par l'ouverture qui la surmonte.

Le réservoir F, qui enveloppe les soupapes E, E, et duquel part le tuyau d'ascension G, contient également de l'air à sa partie supérieure. Cette seconde masse d'air a pour objet d'entretenir un mouvement continu dans le tuyau d'ascension, et agit exactement de la même manière que celle dont nous avons parlé précédemment, à l'occasion de la pompe à incendie (§ 359). Au moment où les soupapes E, E s'ouvrent, l'eau pénètre dans le réservoir, en comprimant l'air qui y est contenu, et n'est pas obligée de s'élancer immédiatement dans le tuyau d'ascension, comme cela arriverait *sans cette disposition*. Il est clair que la pression nécessaire pour

ouvrir les soupapes E, E, serait beaucoup plus grande, dans le cas où toute la colonne d'eau contenue dans le tuyau G devrait passer brusquement de l'état de repos à l'état de mouvement, au moment de leur ouverture; et qu'en conséquence ces soupapes resteraient ouvertes moins longtemps à chaque coup du bélier. La suppression de l'air contenu en F entraînerait donc une diminution considérable dans le volume de l'eau élevée.

L'eau dissout toujours une certaine quantité de l'air avec lequel elle est en contact. C'est cet air dissous dans l'eau qui s'en dégage lorsqu'on la chauffe dans un vase ouvert, et qui s'attache aux parois du vase sous forme de petites bulles. La quantité d'air que l'eau absorbe ainsi est d'ailleurs d'autant plus grande qu'il est soumis à une plus forte pression. Il résulte de là que l'air contenu dans le réservoir F doit se dissoudre peu à peu dans l'eau qui y arrive constamment, et cela en raison de la pression qu'il éprouve, d'après la hauteur à laquelle l'eau est élevée dans le tuyau G. Cette masse d'air doit donc diminuer progressivement, et même disparaître complétement, si l'on n'emploie pas un moyen particulier pour la renouveler. C'est pour cela qu'on a pratiqué une ouverture horizontale H, au-dessous d'une des deux soupapes E. Cette ouverture est fermée par une soupape qui s'ouvre de dehors en dedans. Au moment où, par le mouvement rétrograde de l'eau dans le tuyau A, il se produit une sorte d'aspiration à l'intérieur de ce tuyau, une petite quantité d'air atmosphérique entre par le conduit H, en ouvrant la soupape qui le fermait, et vient se mêler à l'air déjà contenu en C. L'arrivée de cette petite quantité d'air, à chaque coup de bélier, fait qu'une portion correspondante de l'air du réservoir C traverse les soupapes E, lorsqu'elles sont ouvertes, et monte dans la partie supérieure du réservoir F, pour y remplacer celui que l'eau emmène constamment à l'état de dissolution.

Lorsque le bélier hydraulique est bien établi, il peut utiliser jusqu'aux 0,60 du travail moteur dépensé.

MACHINES QUI SERVENT A FAIRE MOUVOIR LES GAZ.

§ 393. On a besoin, dans un assez grand nombre de circonstances, d'employer des machines pour faire mouvoir des gaz. Tantôt il s'agit de retirer d'une capacité fermée une portion plus ou moins grande du gaz qu'elle contient; tantôt, au contraire, il s'agit d'accumuler une grande quantité de gaz dans une pareille capacité; tantôt on a besoin de lancer de l'air en lui donnant une grande vitesse, soit

[redacted]

alimenter la combustion dans un fourneau, soit pour entraîner
matières réduites à l'état de poussières; tantôt on veut produire
age d'une mine, en faisant circuler l'air dans ses galeries. Nous
s faire connaître la disposition des diverses machines qui sont
loyées pour atteindre ces divers buts.

uel que soit l'objet que la machine doive remplir, on doit tou-
s faire en sorte que le gaz qu'elle met en mouvement n'ait à
ntérieur qu'une faible vitesse, pour éviter les frottements con-
ables qui en résulteraient. Il faut aussi avoir soin de ne pas
mouvoir le gaz le long de surfaces anguleuses, et autant que
ible, de ne pas lui faire traverser des ouvertures trop étroites.
machine est destinée seulement à déplacer une certaine masse
az, on doit la disposer de manière que le gaz, en la quittant, ait
vitesse aussi petite que possible; car la vitesse qu'il possède
s sa sortie de la machine, ne peut lui avoir été communiquée
ux dépens du travail moteur dépensé. Si la machine doit lancer
az avec une vitesse un peu grande, il faut tâcher que cette
se ne lui soit donnée qu'au point où le jet gazeux doit produire
effet, afin qu'il n'ait pas à se mouvoir rapidement dans des
ux plus ou moins longs.

394. **Machine pneumatique.** — La *machine pneumatique*,
nous nous sommes déjà servis pour diverses expériences, a
objet de faire le vide dans un espace fermé, c'est-à-dire d'en
er l'air qui y est contenu. Cette machine, *fig.* 457, se compose,
proprement parler, de deux pompes aspirantes (§ 354) accolées
à l'autre. Les tiges des deux pistons sont dentées en forme de
aillères; elles engrènent avec une roue dentée, qui est installée
ilieu d'elles, et dont l'axe est muni d'un levier à poignées,
ant comme une double manivelle. En saisissant les deux poi-
s, et en donnant au levier un mouvement de rotation alternatif
r de son axe, on fait monter ou descendre successivement
un des deux pistons. Mais, pour nous rendre compte de la
ère dont la machine fonctionne pour faire le vide, nous admet-
d'abord qu'il n'y a qu'un seul piston, et par suite un seul corps
mpe.

rsque le piston B, *fig.* 458, monte dans le corps de pompe A,
pape *a* est ouverte, et la soupape *d*, adaptée à une ouverture
raverse le piston, est au contraire fermée. Le bas du corps de
e communique alors librement, par le tuyau CC, avec l'inté-
d'une cloche ou *récipient* D, dont les bords s'appliquent exac-
nt *sur la platine* EE, en supposant toutefois que le robinet F
onvenablement tourné; tandis que toute communication de

cette capacité au dehors est interceptée. L'air contenu dans le récipient D, dans le conduit CC, et au bas du corps de pompe A, se dilate à mesure que le piston s'élève, pour occuper la totalité de l'espace qui lui est offert; une portion de l'air du récipient et du conduit CC passe donc dans le corps de pompe. Lorsque le piston vient ensuite à s'abaisser, la soupape *a* se ferme, et l'air qui se

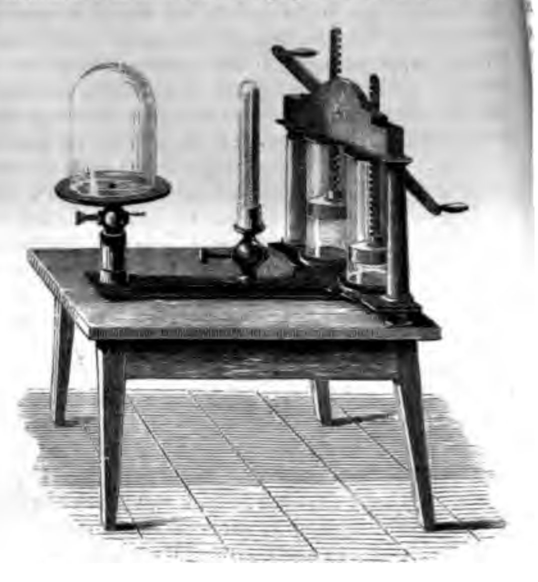


Fig. 457.

trouve dans le corps de pompe, au-dessous du piston, est com[p]
de plus en plus; sa force élastique augmentant, il arrive un m[o]
où elle est un peu supérieure à celle de l'air atmosphérique:
la soupape *d* s'ouvre, sous la pression de l'air qui tend à so[r]
cet air traverse le piston, pour se rendre dans la partie supé[rieure]
du corps de pompe, qui communique toujours librement ave[c l'at]
mosphère par quelques ouvertures pratiquées à cet effet. Le p[iston]
étant arrivé au bas de sa course, reprend un mouvement a[scen]
dant: la soupape *d* se ferme, la soupape *a* s'ouvre, et les cho[ses re]
commencent comme précédemment.

ɔape *a* est fixée à une tige *b*, qui traverse le piston B à t dur. En raison de cette disposition, le piston tend con- t à élever la soupape *a*, tant qu'il monte, et à l'abaisser, descend ; mais un talon *c*, fixé à la tige *b*, vers sa partie re, empêche la soupape de s'élever d'une trop grande , et il en résulte que la soupape ne peut se mouvoir que très it de bas en haut, soit de haut en bas. Aussitôt que le :ommence sa course ascendante ou descendante, il ouvre ıe la soupape *a*, puis elle reste immobile, et le piston con- à se mouvoir, la tige *b* glisse à son intérieur. Il était impor- ıdopter cette disposition pour la soupape *a*, car la différence ces élastiques du gaz situé sous le piston et dans le récipient

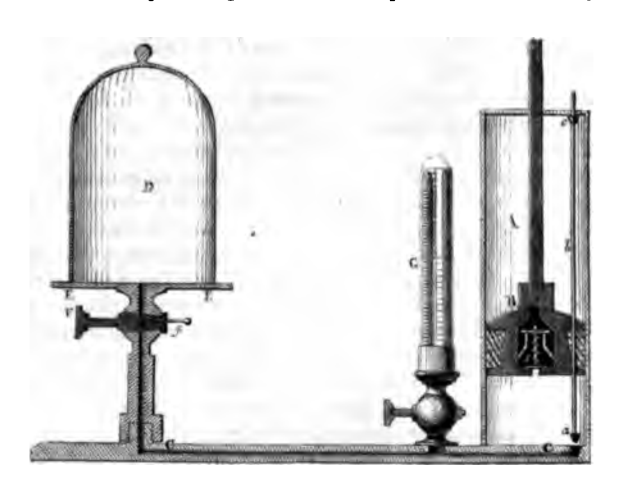


Fig. 458.

ıabituellement très faible vers la fin de l'opération, et l'on n'ı pas pu compter sur elle pour ouvrir ou fermer la soupape ıent convenable.

e robinet F est percé d'une ouverture *e*, qui, pendant l'op , doit être tournée de manière à se raccorder avec le cor ical qui aboutit au centre de la platine EE. Lorsqu'on ı ide suffisamment, sous le récipient D, on ferme le robinet *ercepter toute* communication du récipient avec le con

et le corps de pompe. Une clavette *f*, que l'on enlève à volonté, permet de faire rentrer l'air extérieur dans le récipient, par un petit conduit qui aboutit à l'extrémité du robinet F, et qui est habituellement fermé par cette clavette.

Un large tube de verre G, fermé par le haut, est ordinairement en communication avec le conduit CC; il contient un baromètre de petite dimension, que l'on nomme *éprouvette*. Ce baromètre est destiné à mesurer la force élastique du gaz intérieur, pour faire juger de la marche de l'opération. On a pu lui donner des dimensions beaucoup plus petites qu'au baromètre ordinaire, parce qu'il n'a besoin d'indiquer la pression intérieure que lorsqu'elle est déjà très faible relativement à la pression atmosphérique.

Il est aisé de voir de quelle manière la force élastique de l'air contenu dans le récipient diminue, à mesure que la machine fonctionne. Admettons, par exemple, que la capacité de la partie du corps de pompe qui est au-dessous du piston, lorsqu'il est au haut de sa course, soit le tiers de celle du récipient D et du conduit CC réunis; lorsque le piston est au bas du corps de pompe, et qu'il s'élève jusqu'à sa partie supérieure, le volume de l'air contenu dans le récipient D et le conduit CC s'accroît dans le rapport de 3 à 4; la force élastique de cet air se réduit donc aux trois quarts de ce qu'elle était. Le piston s'abaissant ensuite, la force élastique de l'air du récipient ne varie pas. Ainsi chaque coup de piston a pour effet de réduire la force élastique du gaz contenu dans le récipient aux trois quarts de ce qu'elle était. Après le premier coup de piston, cette force élastique sera les $\frac{3}{4}$ de celle de l'air atmosphérique; après le second, elle en sera les $\frac{9}{16}$; après le troisième,, elle en sera les $\frac{27}{64}$; et ainsi de suite. On voit donc que, quelque grand que soit le nombre des coups de piston que l'on donne, il restera toujours de l'air dans le récipient; mais la force élastique de cet air pourra être rendue aussi petite qu'on voudra.

Ce que nous venons de dire suppose que, chaque fois que le piston s'abaisse jusqu'au bas du corps de pompe, il oblige la totalité de l'air situé au-dessous de lui à le traverser, en soulevant la soupape *d*, pour se répandre dans l'atmosphère. Mais il est impossible de satisfaire complétement à cette condition : lorsque le piston est au bas de sa course, il reste toujours un peu d'air au-dessous de lui. Il en résulte que le mouvement ascendant du piston ne fait pas sortir autant d'air du récipient qu'il le ferait sans cela, puisque cet air qui est resté sous le piston, en se dilatant pour se mettre en équilibre de pression avec l'air du récipient.

une portion notable du corps de pompe. L'influence nui-
la circonstance dont nous parlons se fait sentir de plus en
mesure que la pression diminue dans le récipient ; et il
ême un moment où elle empêche que cette pression dimi-
antage : elle fait que la force élastique du gaz qui reste
récipient ne peut pas décroître au delà d'une certaine
n doit donc, dans la construction d'une machine pneuma-
préoccuper surtout de faire en sorte que la face infé-
piston s'applique le mieux possible sur le fond du corps
).

chine pneumatique, dont l'invention est due à Otto de
se composait d'abord d'une seule pompe aspirante, comme
nous venons de décrire. Mais la manœuvre en était très
surtout lorsqu'on avait déjà beaucoup diminué la force
du gaz intérieur, en raison de ce qu'on avait à vaincre la
atmosphérique, qui s'exerce toujours sur la face supérieure
, et qui n'était pas contre-balancée par la pression beau-
faible agissant sur la face inférieure. C'est pour faciliter
n, que l'on a imaginé d'employer deux pompes aspirantes
istons sont mis en mouvement en même temps et en sens
à l'aide d'une roue dentée qui engrène avec leurs tiges
dentées, *fig.* 457. Ces deux pistons, éprouvant l'un et
pression atmosphérique sur leurs faces supérieures, exer-
un une force de traction de haut en bas sur la roue dentée ;
leux forces se font équilibre, et la manœuvre simultanée
pistons n'est pas plus difficile que si la pression atmosphé-
issait pas du tout sur eux. Il n'y a de résistance à vaincre
qui provient de la différence de pression supportée de
ut par les faces inférieures des deux pistons. Les deux
pompe communiquent avec un conduit unique, qui est
orizontal, puis se relève verticalement pour aboutir au
la platine, comme dans la machine à un seul corps de

hine pneumatique est généralement employée pour faire
ences de diverses natures, dans lesquelles on a besoin de
de, ou au moins de diminuer la pression dans des capa-
etites dimensions. Nous allons voir cependant un exemple
i de cette machine pour faire le vide dans un espace con-

Chemin de fer atmosphérique. — On a eu l'idée de
la pression atmosphérique pour faire mouvoir les convois
sur les chemins de fer. Si l'on imagine qu'un long tuyau



sur les chemins horizontaux ou peu inclinés, tels q
ordinairement, peut donc en outre permettre de
pentes, pour lesquelles l'action des locomotives s
si elle n'était pas complétement annulée (§ 191).

Le système de chemin de fer dont nous parlo
par M. Clegg, et est connu sous le nom de *chem*
phérique. Plusieurs essais en ont été faits. Nous
exemple celui qui a été établi à l'extrémité du c
Paris à Saint-Germain, et qui sert à gravir la ra
à cette dernière ville. D'immenses machines pne
blies vers le haut de la rampe, sont mises en mo
machines à vapeur. La *fig*. 459 représente la
quatre corps de pompe de ces machines. On voit
ces quatre pompes aspirantes est à double effet. L
en supposant que le piston monte; il aspire l'air
qui est ouverte au bas et à droite; et en même
au dehors l'air qui se trouve au-dessus de lui
passer par l'ouverture de la soupape de gauche,
supérieur du corps de pompe. Lorsque le piston
deux soupapes qui sont ouvertes se ferment; le
qui occupent les autres angles de la figure, s'ouvr
aspire l'air dans la partie supérieure du corps de

[redacted]

vers laquelle puissent passer les pièces de jonction du wagon iston. Mais il faut que cette ouverture soit hermétiquement ée, dans la partie du tube ou l'on fait le vide, afin que extérieur ne puisse pas la traverser, pour venir remplacer à

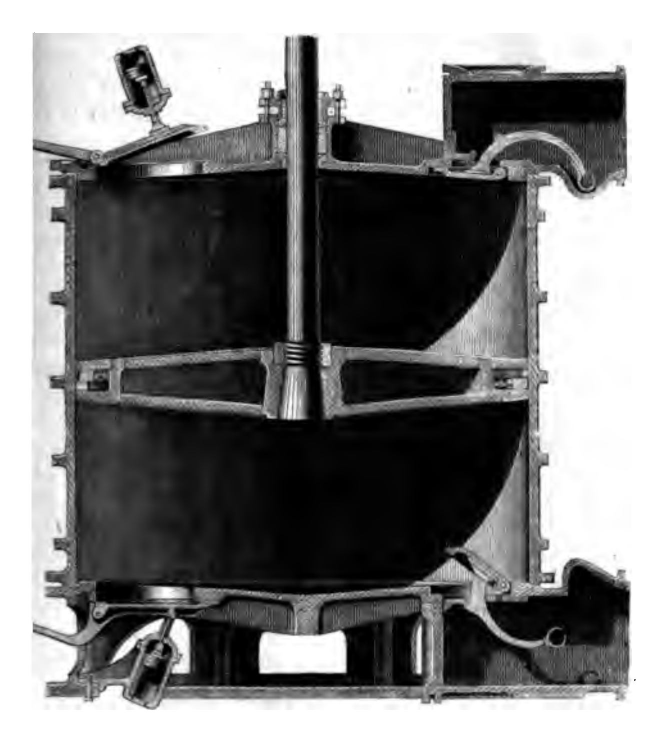


Fig. 459. (*Échelle de 22 millimètres pour mètre.*)

que instant l'air qui est enlevé par les machines pneumatiques. r atteindre ce but, on a disposé, dans toute la longueur du , une soupape formée d'une bande de cuir, longue et étroite, un des bords est fixé au tube, d'un côté de l'ouverture longinale. Cette soupape est renforcée par des plaques de tôle fixées *sa face supérieure*, et n'en conserve pas moins une certaine

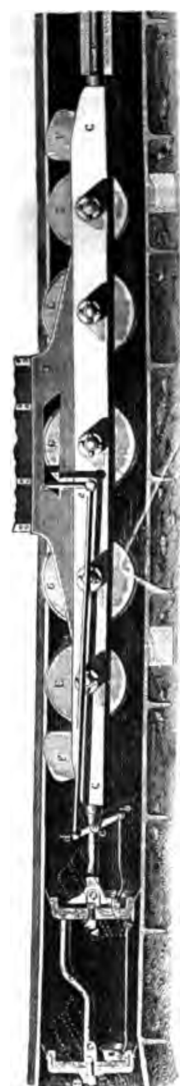


Fig. 460.

flexibilité, en raison de ce que ces sont petites et nombreuses. Elle s habituellement sur les deux bords de ture, qu'elle ferme ainsi complèteme elle est soulevée successivement dans l ses parties de sa longueur, à mesu piston marche dans le tube en entr convoi, afin de laisser passer les p établissent la liaison entre ce piston mier wagon.

La *fig.* 460 représente l'ensemble reils qui constituent le piston moteur. proprement dit est en A ; il est mun son contour d'une bande de cuir qui sur les parois intérieures du tube, afi cher l'air de passer entre ces parois et Un second piston B, placé en avar mier, est destiné à le suppléer au l s'opposant au passage de l'air qui n' été arrêté par le premier piston. La mune à ces deux pistons est fixée à l d'une sorte de châssis long et étroi plaque de tôle D, attachée à ce châ relier le piston au wagon qui est sit sus ; cette plaque sort du tube en bant, pour passer autour du bord de l sans que celle-ci ait besoin d'être tr



Fig. 461.

fig. 461. A l'extrémité postérieure CC est adaptée une pièce de fonte

[redacted]

contre-poids aux pistons A, B, afin que le centre de gravité
t l'appareil soit sensiblement placé au milieu de la plaque de
qui le supporte. Le châssis CC porte deux pièces F, F, qui
ur objet de soulever la soupape longitudinale du tube ; cinq
G, G, dont les axes sont également supportés par le châssis
oulent sur la face inférieure de cette soupape H, *fig.* 461,
maintenant suffisamment ouverte, pour que la pièce D puisse
' librement, et aussi pour que l'air extérieur puisse rentrer.
ure que le piston s'avance dans le tube.
n'emploie la pression atmosphérique, pour faire mouvoir les
is, que lorsqu'ils montent la rampe qui conduit à Saint-Ger-
La seule action de la pesanteur suffit pour les faire descendre
g de cette rampe, jusqu'au point où finit le tube atmosphé-
. et où des locomotives viennent les remorquer. Si l'on veut
vir de la même voie pour la descente que pour la montée, tout
reil des pistons A, B, et du châssis CC, avec ce qu il porte,
parcourir le tube atmosphérique en sens contraire. Pour qu'il
ésulte pas de trop grands frottements, on fait basculer les pis-
A, B, de manière à leur donner la position oblique qui est
uée sur la *fig.* 460. A cet effet, une tringle *ab* est articulée
part au piston A, et d'une autre part au levier *bcd*, mobile
r du point *c*; une seconde tringle *de* relie le levier *bcd* à un
ef, qui traverse l'ouverture de la soupape, en passant le long
plaque D, et peut être manœuvré de l'intérieur du wagon. En
nt sur ce levier *ef*, de manière que son extrémité inférieure *e*
orte vers la droite de la figure, on pousse la partie inférieure
ton A vers la gauche, et on l'amène ainsi à prendre la position
e dont nous venons de parler. Une tringle, articulée d'une
u piston A, d'une autre part au piston B, fait que ce second
se place de la même manière que le premier.
système de chemin de fer que nous venons de décrire fonc-
depuis plusieurs années à Saint-Germain, et a très bien
, mais il est extrêmement coûteux, et ce n'est que dans
rconstances exceptionnelles qu'on pourrait l'employer avec
ige.

96. **Machines aspirantes.** — Nous avons indiqué (§ 265)
oyen qui est très employé pour produire artificiellement
ge d'une mine, et qui consiste à établir un foyer vers le bas
uits, pour déterminer un courant d'air par les différences de
rature. Mais on se sert aussi, pour atteindre le même but,
chines destinées à mettre en mouvement la masse d'air con-
à *l'intérieur de la mine.*

Pour qu'il y ait renouvellement de l'air intérieur, il fau
que la cavité souterraine communique par deux voies d
avec l'air extérieur, soit par deux puits distincts, soit
portions d'un même puits, que l'on a isolées l'une de
moyen d'une cloison qui s'étend dans toute sa profo
mouvement qu'il s'agit de produire a pour effet de faire
l'air atmosphérique par un des deux puits, s'il y en a d
faire circuler dans les différentes parties de la mine q
être aérées, et ensuite de le faire remonter par l'autre p
y arriver, on emploie souvent des machines aspirante
installe à l'orifice du puits par lequel on veut faire sortir
rieur; ce sont de véritables machines pneumatiques,
différence qu'elles doivent extraire du puits une gran
d'air, en n'y déterminant qu'une très faible diminution d
A mesure que la machine fonctionne, l'air de la mine
marche, pour combler le vide qu'elle tend à opérer; et i
une circulation continuelle de cet air.

Ces machines aspirantes présentent habituellement la
position que la machine pneumatique. Ce sont de vast
ouverts par le haut, dont le fond est percé de larges
munies de soupapes, et dans lesquels se meuvent des pi
également d'ouvertures à soupapes. Nous indiquerons
une disposition particulière, qui est très employée da
du Harz, et qui a pour objet de faire disparaître pr
plétement les frottements des pistons contre les paroi
dres. Deux cloches cylindriques A, A′, *fig.* 462, sont
aux deux extrémités d'un balancier B, au moyen de ch
Le mouvement oscillatoire que l'on donne au balan
de son milieu fait élever et abaisser successiveme
de ces cloches, qui plongent dans des cuves remplies
tuyaux D, D′ s'élèvent au milieu de ces cuves, jusq
de la surface de l'eau, et communiquent par leur
rieure avec un conduit E, par lequel l'air de la mi
aspiré; l'orifice supérieur de chacun de ces tuyaux
par une soupape s'ouvrant de bas en haut. Les cloches
d'ailleurs percées, dans le haut, d'ouvertures garni
papes qui s'ouvrent dans le même sens. Lorsqu'une cl
lève, sa soupape se ferme, et l'air de la mine se re
térieur, en passant par le tuyau D, dont la soupa
Lorsque ensuite cette cloche s'abaisse, la soupape du
ferme, celle de la cloche s'ouvre, et l'air contenu à s
est expulsé au dehors. Le niveau de l'eau de chaqu

[redacted]

le même à l'intérieur de la cloche et à l'extérieur, en raison e que la force élastique de l'air contenu dans la cloche est tt plus grande, tantôt plus petite que celle de l'air atmosphé-

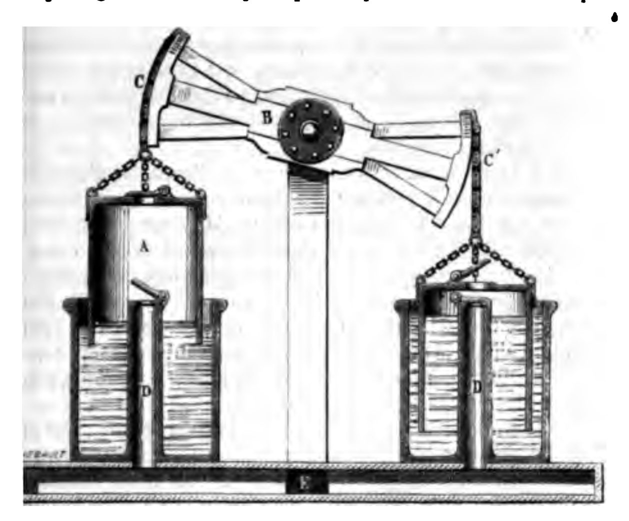


Fig. 462.

e; mais ces variations de force élastique sont assez faibles pour n'en résulte pas de différences de niveau considérables pour quide. On voit que ce moyen d'éviter les frottements d'un on contre les parois du cylindre dans lequel il se mouvrait, n'est icable qu'autant que l'on n'a pas à produire de grands chanents dans la force élastique du gaz sur lequel la machine doit er.

397. **Machine de compression.** — Quand on veut accuer une grande quantité d'air dans un espace fermé, on se sert e machine de compression, qui est exactement pareille à la mae pneumatique représentée par la *fig*. 457 (page 580), si ce n'est toutes les soupapes sont disposées en sens inverse, c'est-à-dire lles s'ouvrent de haut en bas. Lorsqu'un des pistons s'élève, sa ape s'ouvre, et celle qui est au bas du corps de pompe se ie; l'air extérieur, en traversant le piston, vient remplir la pordu corps de pompe qui est au-dessous de lui. Lorsque ensuite iston s'abaisse, sa soupape se ferme; il comprime l'air qui

vient de le traverser, et le fait ainsi passer dans le récipient, en ouvrant la soupape qui se trouve au bas du corps de pompe. Il suffit donc de donner un mouvement de va-et-vient à chacun des deux pistons, pour introduire constamment de nouvelles quantités d'air dans le récipient, qui a besoin en conséquence d'être fortement maintenu, pour résister à la pression de l'air intérieur. Un manomètre à air comprimé (§ 264) remplace l'éprouvette de la machine pneumatique, et sert à faire connaître la force élastique du gaz intérieur à chaque instant.

C'est à l'aide d'une machine de compression, analogue à celle dont nous venons de parler, mais qui se réduit à une simple pompe foulante, que l'on comprime de l'air dans la crosse des fusils connus sous le nom de *fusils à vent*. Cet air comprimé est destiné à remplacer la poudre, pour donner une impulsion aux projectiles introduits dans le canon du fusil. Lorsqu'on veut faire partir ces projectiles, il suffit de lâcher une détente, qui laisse sortir une certaine quantité d'air de la crosse; cet air, ne pouvant s'échapper que par l'intérieur du canon, chasse devant lui les corps qu'on y a précédemment introduits.

§ 398. **Soufflets**. — Les soufflets, dont on se sert pour activer la combustion dans les foyers d'appartements ne sont autre chose que des machines destinées à puiser de l'air dans l'atmosphère, pour le lancer avec une certaine vitesse sur le combustible en ignition.

Le soufflet ordinaire est formé de deux plaques de bois terminées chacune par un manche A, B, *fig.* 463, et réunies l'une à l'autre par une pièce de cuir flexible, qui laisse entre elles un espace C fermé de toutes parts. Une ouverture D, percée dans la plaque inférieure, est recouverte en dedans d'un morceau de cuir flexible, qui n'est attaché qu'en quelques points de son contour, et fait fonction de soupape. Ce morceau de cuir s'applique sur l'ouverture D, et la ferme complétement, lorsque l'air intérieur tend à sortir; tandis que, si l'air extérieur tend à pénétrer dans le soufflet par l'ouverture D, il soulève facilement le cuir, et peut ainsi entrer librement. Un tuyau allongé et conique E termine le soufflet; c'est par ce tuyau que l'air doit être lancé de l'intérieur à l'extérieur. Pour manœuvrer le soufflet, on saisit un des manches A, B, dans chaque main, et l'on fait mouvoir le manche B de manière à

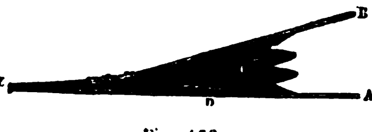


Fig. 463.

t à le rapprocher alternativement de l'autre. En vertu de ent, la capacité intérieure C augmente et diminue alter-. Lorsque cette capacité augmente, il se forme un vide r et l'air atmosphérique s'y introduit à la fois par les D, E, mais surtout par la première D, qui est plus large. contraire les deux manches A, B, se rapprochent l'un l'air intérieur est comprimé, et ne pouvant sortir par D, qui est alors fermée, il est obligé de s'échapper en · le tuyau E.

ızeux ne sort que par intermittence du soufflet dont nous parler, et de plus, au moment où se fait l'aspiration, l'air endant à entrer aussi bien par le tuyau E que par l'ouver-peut arriver que de la flamme entre par ce tuyau, et ler l'intérieur du soufflet. Pour obvier à ces deux incon-on a imaginé les soufflets dits *à double vent*. Un soufflet e est formé de trois plaques de bois, dont deux seule-rminent par des manches A, B, *fig.* 464. Entre ces pla-disposées, comme nent, deux pièces forment deux com-, C, F. Le premier mpartiments, C, ue avec l'extérieur iverture D, garnie ape de cuir pareille it nous avons déjà

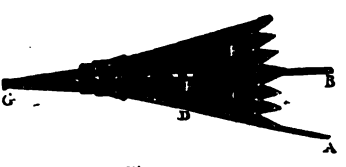


Fig. 464.

mmunique en outre avec le second compartiment F, par ure E garnie d'une soupape du même genre. A l'extrémité id compartiment F, existe un conduit aboutissant au tuyau , par lequel l'air doit être lancé. Lorsqu'on écarte les deux ı, B, la soupape E se ferme, la soupape D s'ouvre : et l'air pénètre dans le compartiment C. Lorsque ensuite on rap-deux manches A, B, la soupape D se ferme, la soupape et l'air passe de C en F. Un petit ressort intérieur tend ent à rapprocher l'une de l'autre les deux plaques de bois ennent entre elles le compartiment F. Au moment où de C en F, ce petit ressort cède, et permet à l'espace F dir pour le contenir ; mais il réagit bientôt, et en compri-iir, il l'oblige à sortir par le tuyau G. Si l'on continue à oir les manches A et B, en les éloignant et en les rappro-*cessivement* l'un de l'autre, de nouvelles quantités d'air *chaque instant* de C en F, avant que la réaction du res-

sort ait eu le temps d'expulser la totalité de l'air qui s'était précédemment introduit dans le second compartiment F. La sortie de l'air par le tuyau G n'éprouve donc pas d'interruption, et le jet gazeux présente une régularité d'autant plus grande que le mouvement des manches A et B est plus rapide, ce qui ne permet pas à la tension du ressort contenu en F de varier dans des limites trop étendues.

§ 399. **Machines soufflantes.** — Pour lancer de l'air à l'intérieur des fourneaux, dans les usines, on emploie des machines soufflantes de diverses formes, mises en mouvement, soit par des roues hydrauliques, soit par des machines à vapeur. Quelquefois ce sont d'immenses soufflets analogues aux soufflets que nous venons de décrire ; d'autres fois ce sont des machines à piston, en tout pareilles à la machine pneumatique représentée par la *fig.* 459 (page 585), si ce n'est que les soupapes s'ouvrent en sens contraires. Lorsqu'on emploie ces dernières machines, l'air qu'elles puisent dans l'atmosphère est refoulé par elles dans des tuyaux qui le conduisent aux différents orifices par lesquels il doit s'échapper. La régularité de la vitesse avec laquelle l'air est lancé étant d'une grande importance pour la marche des fourneaux, on emploie souvent pour l'obtenir un moyen analogue à celui que nous avons trouvé dans le soufflet à double vent. Ce moyen consiste à placer sur le chemin que doit parcourir l'air, à sa sortie de la machine, un réservoir cylindrique, *fig.* 465, dans lequel se trouve un piston chargé de poids et libre de monter ou de descendre en glissant sur les parois du réservoir. L'air fourni par la machine arrive dans ce réservoir d'un côté, et en sort de l'autre. Au moment où une grande quantité d'air vient se rendre dans cette capacité intermédiaire, le piston s'élève ; il s'abaisse, au contraire, lorsque l'air arrive en moins grande abondance : en sorte que la force élastique de l'air contenu au-dessous du piston régulateur reste à très peu près la même, et la vitesse avec laquelle il sort du réservoir ne varie pas sensiblement.

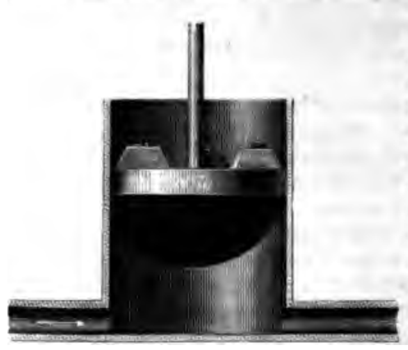


Fig. 465.

›e sert encore des machines soufflantes pour produire l'aé-. es mines. A cet effet, on installe une machine de ce genre à ›e du puits par lequel on veut faire descendre l'air puisé dans ›sphère, pour établir un courant destiné à parcourir les galeries rraines, et à remonter par un autre puits. Mais les machines antes employées pour l'aérage des mines diffèrent de celles ›ont destinées à lancer l'air dans des fourneaux, en ce que les ›ières doivent faire mouvoir une grande quantité de gaz avec faible vitesse, tandis que les autres sont destinées à commu- ıer une vitesse considérable à une quantité de gaz beaucoup ns grande.

| 400. **Ventilateurs**. — Supposons que l'on fasse tourner rapi- nent, à l'intérieur d'un cylindre, et autour de son axe, des pa- ›es disposées de manière à entraîner avec elles l'air au milieu quel elles se meuvent. Cet air, prenant ainsi un mouvement pide de rotation, donnera lieu au développement de forces cen- ifuges (§ 409) qui tendront à l'éloigner de l'axe du cylindre, pour accumuler vers sa surface. Si le cylindre est fermé de toutes parts, ı pression ne restera pas la même dans toute l'étendue de la masse l'air qu'il contient; ›ette pression dimi- ıuera dans le voisi- ıage de l'axe, et ıugmentera dans les ›oints qui en sont le plus éloignés. Les ›hoses étant dans cet état, si l'on vient à établir une commu- nication de l'atmos- phère avec la partie centrale du cylindre, et à pratiquer une ›uverture qui per- mette à l'air accu- mulé vers la surface de s'échapper, il se ›roduira un mouve- nent continuel du gaz, qui entrera par le centre, et sortira p› ›irconférence. La machine ainsi obtenue est ce que l'on nomm ›entilateur.

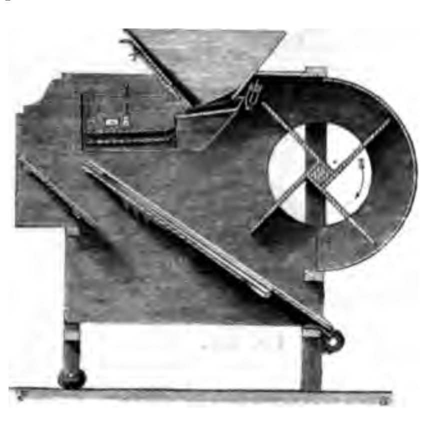


Fig. 466.

Quelquefois les palettes du ventilateur sont planes, et di

suivant des rayons du cylindre dans lequel elles se meuvent. On en a un exemple dans le *tarare*, *fig*. 466, dont on se sert pour nettoyer les grains. Le courant d'air déterminé par la rotation des palettes a ici pour objet d'entrainer les poussières et les débris de paille, afin de les séparer du grain, qui ne cède pas aussi facilement à l'action du courant, en raison de ce que, à égalité de surface, il est beaucoup plus pesant.

Les *fig*. 467 et 468 représentent le ventilateur qui est habituellement employé comme machine soufflante pour lancer de l'air dans les fourneaux des usines. Ses palettes sont légèrement courbées en sens contraire du sens dans lequel elles se meuvent, afin qu'elles abandonnent plus facilement l'air avec lequel elles sont en

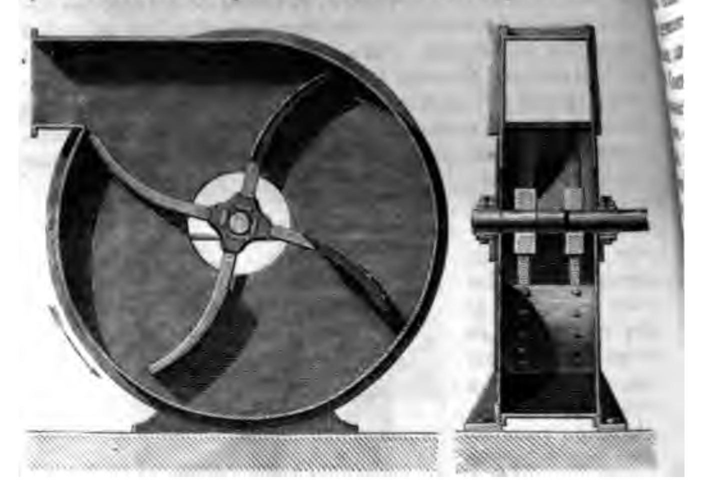


Fig. 467. Fig. 468.

contact au moment où elles passent devant le tuyau de dégagement que l'on voit au haut de la *fig*. 467. Les ventilateurs de ce genre reçoivent ordinairement un mouvement extrêmement rapide. Ils projettent l'air avec une grande régularité dans le tuyau avec lequel ils sont mis en communication.

On se sert quelquefois d'un ventilateur pour aspirer l'air d'un puits de mine, afin de déterminer le courant nécessaire à l'aérage de la mine. Pour cela, on installe l'appareil à l'orifice même du

l'orifice
duit qui
munica-
s; et l'on
l'air du
brement
lu venti-
que sa
est ou-
es parts
ère. Les
eprésen-
ateur de
la dispo-
quée par
s palet-
s, et diri-
contraire
t qu'on
tte forme
our objet
orte que
ne faible
ment ou
né dans
ar la ma-
ssant sur
sens con-
dans le-
meuvent,
ue, après
machine,
différence
du ven-
esse pro-
ettes. Ici
sont pas
des bras
central;
tées à un
re *qui for-*
entilateur opposée à celle par laquelle l'air est aspiré



Fig. 469.

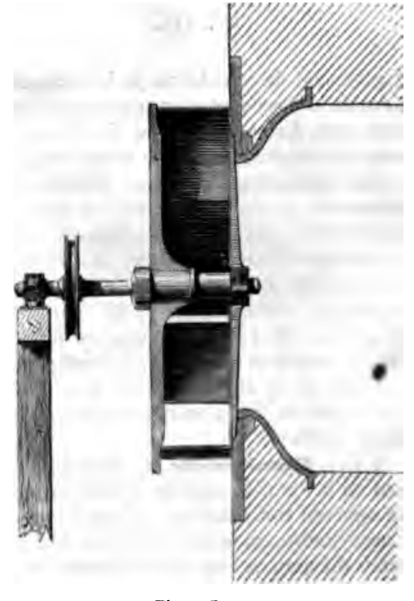


Fig. 470.

de l'intérieur de la mine : ce disque est fixé à l'arbre, et tourne av lui en entraînant les palettes.

§ 401. **Vis pneumatique.** — On se sert encore quelquefois, p l'aérage des mines, de l'appareil représenté par la *fig.* 471, et qui siste en une vis à la filet, mobile autour d axe vertical à l'intér d'un cylindre fixe l'emboîte exactem Cette vis, que l'on me *vis pneumatiq* une grande analog forme avec l'hélic *fig.* 395 (page 4 fonctionne à peu la même manière lice de bateau, nant dans un se veritable, déter

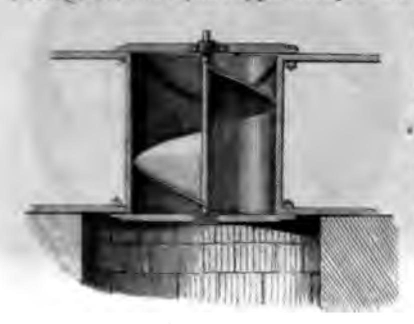


Fig. 471.

mouvement de translation du bateau, et donne en même l'eau qu'elle rencontre un mouvement en sens contraire. teau était fortement amarré au rivage, l'hélice ne se d plus en tournant ; mais elle agirait toujours sur l'eau, et s serait même augmentée par l'impossibilité dans laquel trouverait de céder à la pression mutuelle qui s'exerce surface et le liquide ; la rotation de l'hélice donnerait d un courant d'autant plus rapide qu'elle tournerait plus précisément ce que produit la vis pneumatique dont nou cupons maintenant. Si on la fait tourner rapidement dan tain sens, elle produit un courant d'air ascendant, et comme machine aspirante, à l'orifice du puits sur lequ installée. Il est clair que, si on la faisait tourner en sens elle donnerait lieu à un courant descendant, et agirait co chine soufflante.

§ 402. **Cagniardelle.** — Pour faire comprendre le n tion de la vis d'Archimède (§ 343), nous avons considé un appareil consistant en un simple tube de verre enro d'un cylindre, en forme de filet de vis, *fig.* 398 (page 4 avons dit que, si l'on faisait tourner cet appareil dans u sens, et que l'extrémité inférieure *a* du tube plongeât, pe portion de chaque tour, dans un réservoir d'eau, des qu liquide seraient successivement puisées par la partie in

, et monteraient à la suite les unes des autres en se plaçant
s au bas de ces diverses spires; en sorte que ce liquide vien-
 déverser par l'extrémité *b* du tube, de laquelle sortirait, à
 tour, la quantité de liquide contenue dans une des spires.
sinons maintenant que le même appareil soit plongé dans un
oir d'eau dont le niveau soit plus élevé, de manière que,
nité *a* restant toujours sous l'eau, pendant la rotation, l'ex-
 b entre dans le liquide et en sorte alternativement à chaque
oncevons de plus que le mouvement de rotation donné au
oit de sens contraire à celui qu'on lui donnait précédemment
'il s'agissait d'élever de l'eau. Il est aisé de voir qu'au mo-
où l'extrémité *b* du tube, en s'abaissant, vient rentrer dans
une certaine quantité d'air est emprisonnée dans ce tube; et
si le mouvement de rotation continue, cette quantité d'air,
hant toujours à occuper le haut de la spire dans laquelle elle
ngagée, se mouvra le long du tube, en se rapprochant de
émité *a*. A chaque tour, une nouvelle quantité d'air s'intro-
 dans le tube; ces quantités d'air viendront occuper succes-
ment les parties supérieures des diverses spires; et, à chaque
l'une d'elles se dégagera en *a*. On conçoit dès lors que l'ap-
l, employé de cette manière, peut devenir le type d'une ma-
 soufflante.

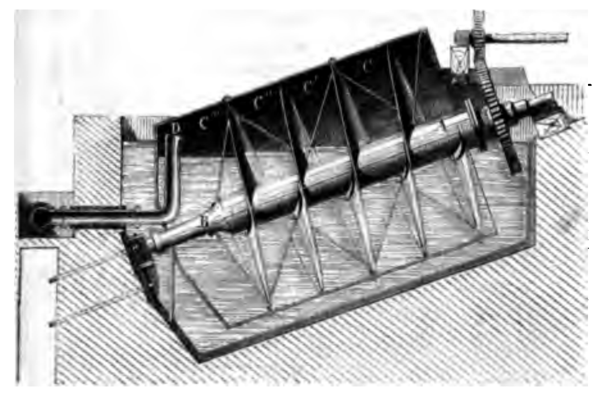
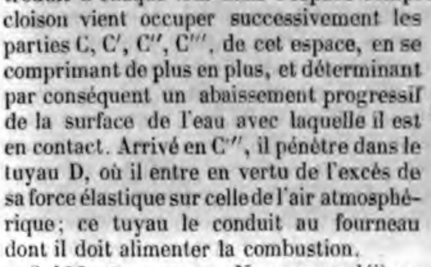


Fig. 472.

tte idée a été réalisée par M. Cagniard-Latour. La machine
ante qu'il a construite d'après ce principe est désignée sous le
le cagniardelle. Elle se compose d'un arbre AB, fig. 472, au-

quel est fixée une cloison hélicoïdale de tôle, terminée extérieurement à un cylindre également de tôle. Le tout est placé dans une position inclinée, à l'intérieur d'un réservoir contenant de l'eau, et est mis en mouvement au moyen d'engrenages. L'air qui s'introduit à chaque tour dans l'espace compris entre les spires de la



cloison vient occuper successivement les parties C, C′, C″, C‴, de cet espace, en se comprimant de plus en plus, et déterminant par conséquent un abaissement progressif de la surface de l'eau avec laquelle il est en contact. Arrivé en C‴, il pénètre dans le tuyau D, où il entre en vertu de l'excès de sa force élastique sur celle de l'air atmosphérique; ce tuyau le conduit au fourneau dont il doit alimenter la combustion.

§ 403. **Trompe.** — Nous avons déjà vu dans le bélier hydraulique (§ 392), un exemple dans lequel l'eau d'une chute agit directement pour produire du travail utile, sans que sa force ait besoin d'être transmise à une machine motrice, comme cela a lieu ordinairement; nous allons en voir un autre exemple dans la *trompe*, machine soufflante qui est très employée dans les pays de montagnes. Cette machine se compose essentiellement d'un tuyau vertical de bois.

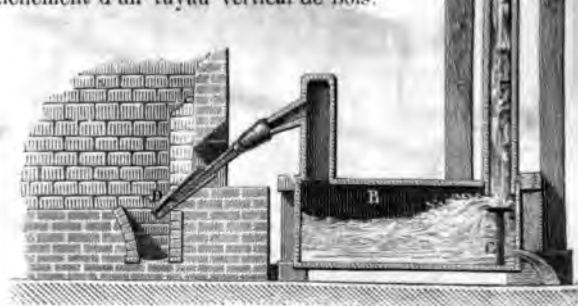


Fig. 473.

fig. 473, dans lequel on laisse tomber l'eau du bief supérieur. Le haut du tuyau est muni d'une espèce d'entonnoir conique par le

[redacted]

s'introduit à son intérieur; cet entonnoir donne lieu à la formation d'une veine liquide, qui n'occupe pas toute la largeur du u, et qui tend à entraîner dans son mouvement l'air qui se re autour d'elle. Des ouvertures A, A, permettent à cet air inur de suivre en effet le mouvement descendant de l'eau, sans en résulte un vide dans le haut du tuyau, puisque l'air ené de cette manière est remplacé immédiatement par l'air exté-, qui entre par ces deux ouvertures A, A. Par cette disposition, rieur du tuyau est constamment parcouru de haut en bas par élange d'air et d'eau. Le tuyau débouche inférieurement dans caisse fermée B. La colonne descendante vient se briser sur petite tablette C, destinée à faciliter la séparation de l'air et de . L'air se loge dans le haut de la caisse, et y possède une force ique supérieure à celle de l'air atmosphérique : en vertu de xcès de force élastique, il se rend par le tuyau D à l'intérieur fourneau voisin, ou bien encore dans un puits de mine qu'il t d'aérer. Quant à l'eau qui tombe au fond de la caisse B, elle ule constamment au dehors, par une ouverture que l'on voit de la tablette C.

e jet gazeux produit par une trompe présente une très grande larité. Mais cette machine est peu avantageuse sous le rapport économie du travail : la quantité de travail moteur qui serait tement nécessaire pour produire la compression de l'air dans aisse B n'est guère que les 0,15 du travail moteur, qui corres-d à la quantité d'eau dépensée.

orsque, par suite d'une explosion dans une mine, on a besoin produire promptement un renouvellement de l'air, on a recours quefois à un moyen qui est fondé sur le même principe que la ape. Ce moyen consiste à détourner le cours d'un ruisseau in, et à en faire couler l'eau dans le puits : cette eau entraîne c elle une quantité d'air considérable, qui permet de descendre s la mine pour porter secours aux ouvriers blessés, et aussi r reprendre les travaux que l'explosion a interrompus.

EMPLOI DU VENT COMME MOTEUR.

404. Les mouvements de l'air atmosphérique peuvent être loyés pour produire du travail, tout aussi bien que le mouvement eau dans les cours d'eau. Cette source de travail ne se rencontre seulement dans quelques localités ; elle existe partout, et en nde abondance. Aussi le vent serait-il un moteur des plus pré-x, *s'il agissait avec* une certaine régularité. Mais l'extrême

irrégularité de son action, résultant des fréquentes varia
son intensité et de sa direction, fait qu'on ne peut pas y a
cours pour effectuer un travail qui demande de la continui
ne permette pas de trop grands changements dans la vi
mécanismes employés à sa production.

Les appareils destinés à recevoir l'action du vent pour
mettre aux pièces qui ont des résistances à vaincre son
mêmes conditions que les roues à palettes que l'on install
courant d'une rivière (§ 380). Ils ne doivent utiliser qu'u
extrêmement faible du travail que la masse totale de l'ai
vement est capable de produire; d'ailleurs, on n'est pas
restreindre leurs dimensions dans d'étroites limites: aus
pas à se préoccuper de la forme de ces appareils autant
vrait le faire s'il s'agissait d'utiliser la plus grande porti
de la puissance d'un courant d'air limité. La simplicité
struction et la facilité des réparations sont les conditi
pales qu'on doit chercher à remplir dans la disposition d
de ce genre. Quant à la grandeur du travail qu'ils pourr
elle variera suivant qu'on leur donnera des dimensions pl
considérables.

§ 405. **Navires à voiles.** — Le vent est le moteur
ployé dans la navigation sur mer; il a même été le s
bien longtemps, et ce n'est que dans le siècle actuel qu
la vapeur lui a été substituée dans un certain nombre
Le peu de régularité de l'action du vent se fait néc
sentir dans la marche du navire, qui lui emprunte sa fo
Tantôt le calme de l'atmosphère l'oblige à rester dans i
lité presque complète pendant un temps plus ou moins l
au contraire, la violence du vent l'expose aux plus gran
D'un autre côté, lorsque la vitesse du vent ne sort pas
qui conviennent à une bonne navigation, sa direction
très différente de celle de la route que l'on veut suivre.

Pour qu'un navire puisse recevoir du vent l'action
cessaire à sa marche, on le surmonte d'un grand appa
et de cordages, destiné à porter les *voiles* sur lesquelles
exercer sa pression. Ces voiles sont de grandes surfac
qui peuvent se développer et se replier à volonté, et au
peut donner des directions différentes, suivant les besoi
vire doit se mouvoir précisément dans la direction du v
le même sens que lui, il est clair qu'il suffit de dispos
de manière que leurs surfaces soient perpendiculaire
navire, le vent venant les rencontrer de face, exerce

pression qui est dirigée dans le sens de cet axe, et qui détermine un mouvement de progression dans le même sens. Mais si la direction du vent n'est pas la même que celle du chemin qu'on veut parcourir, on est obligé de donner aux voiles une position oblique par rapport à la longueur du navire, et, en outre, de faire en sorte que le vent arrive obliquement sur leur surface. Le vent, en glissant sur les voiles, exerce sur elles une pression qui leur est toujours perpendiculaire, et qui a, en conséquence, une direction différente de celle du mouvement de l'air; d'un autre côté, la marche du navire n'ayant pas lieu exactement dans le sens de sa longueur, et le gouvernail étant tourné plus ou moins dans un sens convenable (§ 332), il en résulte une résistance du liquide qui est oblique par rapport à la direction de cette marche. Si l'on observe que la résultante des pressions que l'air exerce sur le navire, pressions qui sont supportées en très grande partie par les voiles, doit constamment avoir la même direction que la résistance opposée par le liquide, on verra que les deux causes qui viennent d'être signalées concourent pour produire une obliquité plus ou moins grande de la direction du mouvement du navire sur celle du vent qui le détermine.

En agissant convenablement sur la position des voiles, et sur le gouvernail, on peut faire en sorte que cette obliquité devienne très grande; on peut même arriver à faire marcher le navire en sens contraire du vent. Quand on remonte, pour ainsi dire, le courant d'air qui produit le mouvement du navire, en cherchant à faire faire à la direction de ce mouvement le plus petit angle possible avec la direction d'où vient le vent, on dit qu'on marche *au plus près du vent*; l'angle formé par ces deux directions peut être réduit jusqu'à 65°, et même 60° dans les circonstances les plus favorables. En marchant ainsi au plus près, tantôt d'un côté du vent, tantôt de l'autre, de manière à faire des zigzags, on parvient à se transporter en définitive exactement en sens contraire du vent: c'est ce que l'on appelle *louvoyer*.

§ 406. **Moulins à vent.** — La force du vent est employée depuis un temps immémorial pour faire mouvoir des moulins à farine, auxquels on donne le nom de *moulins à vent*. La *fig.* 474 montre la disposition de ces machines. Un arbre AB, susceptible de tourner sur lui-même, dans les coussinets qui le supportent, est disposé dans la direction même du vent. Il fait un angle de 10 à 15 degrés avec l'horizon. Cette inclinaison a été adoptée, parce que l'on a observé que le mouvement de l'air n'est généralement pas horizontal, mais *que sa direction fait* ordinairement un petit angle avec la surface de la terre. Quatre bras sont fixés à cet arbre, à son extrémité

A, perpendiculairement à sa longueur, de manière à former u sorte de croix; chacun de ces bras sert d'axe à une surface à p près rectangulaire, C beaucoup plus longue que large, qui est destinée à recevoir l'action du vent, et que l'on nomme une *aile*. On donne souvent aux ailes une largeur de 2^{m}, et une longueur de 11^{m}; l'extrémité la plus rapprochée de l'arbre AB en est à une distance de 2^{m}: ce qui fait que l'espèce de roue formée par l'ensemble des quatre ailes a un diamètre de 26^{m}. Chaque aile est formée de barreaux de bois qui sont implantés transversalement de distance en distance dans la pièce de bois qui lui sert d'axe, et

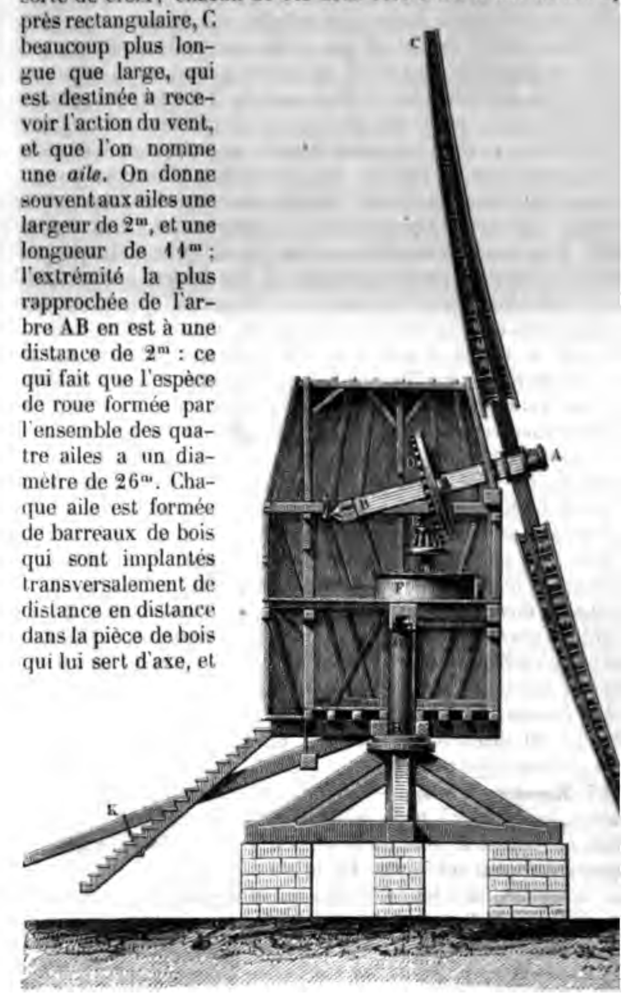


Fig. 474.

dont les extrémités sont reliées par deux autres pièces de bois s'étendant parallèlement à l'axe, dans toute la longueur de l'aile. Le châssis à jour ainsi construit a une grande analogie de forme avec une échelle a montants parallèles, qui serait fixée à l'axe de l'aile par les milieux de ses divers barreaux. Des toiles, ou voiles, s'étendent à volonté sur toute l'étendue de ce châssis, de manière à le transformer en une surface continue destinée à arrêter l'air dans son mouvement, et par conséquent à recevoir la pression qui doit en résulter.

Les surfaces des ailes ne sont pas dirigées dans le plan perpendiculaire à l'arbre AB qui contient leurs axes; elles présentent une certaine inclinaison sur ce plan, de manière à recevoir obliquement l'action du vent, dont la direction est la même que celle de l'arbre AB. Il est aisé de se rendre compte de la nécessité de cette obliquité des ailes sur la direction de l'arbre AB. Si une aile avait sa surface perpendiculaire à AB, elle recevrait l'action du vent en face, et en éprouverait une pression dirigée de la même manière que le vent, c'est-à-dire parallèlement à l'arbre AB: cette pression tendrait à repousser l'aile en arrière, à faire glisser l'arbre AB dans le sens de sa longueur; mais elle ne tendrait nullement à le faire tourner dans un sens plutôt que dans l'autre. Si la surface de l'aile était, au contraire, dirigée parallèlement à AB, le vent ne la rencontrerait que par sa tranche, et elle n'en éprouverait qu'une action extrêmement faible, qui d'ailleurs ne tendrait pas davantage à faire tourner l'arbre AB. Tandis que, si l'on donne à l'aile une certaine inclinaison sur l'arbre, la pression qu'elle éprouve de la part du vent, étant toujours perpendiculaire à sa surface, sera également oblique par rapport à l'arbre AB, et en conséquence cette pression tendra à le faire tourner dans un certain sens. Les inclinaisons des diverses ailes sont disposées de manière que les pressions supportées par chacune d'elles tendent toutes à faire tourner l'arbre AB dans un même sens.

L'obliquité de la surface des ailes sur la direction de l'arbre AB n'est pas ordinairement la même dans toute la longueur de chacune d'elles; cette obliquité va en diminuant depuis l'extrémité de l'aile située près de l'arbre, jusqu'à l'autre extrémité : en sorte que l'aile présente une surface qui n'est pas plane, mais qui est légèrement gauche. Dans les moulins bien construits, la partie de l'aile qui est la plus rapprochée de l'arbre fait un angle de 60 degrés avec la direction de cet arbre, et la partie la plus éloignée fait avec cette direction un angle de 80 degrés. Ce changement d'obliquité, *d'un point à un autre* de l'aile, est motivé par la vitesse plus ou

moins grande avec laquelle ses divers points se meuvent en même temps. Il ne nous sera pas difficile de reconnaître qu'en effet cette différence de vitesse nécessite une différence d'inclinaison de la surface. Soit MN, *fig.* 475, la portion de surface de l'aile que nous considérons. Admettons que le vent se meuve dans le sens de la flèche f, et que la surface MN, tournant autour de l'arbre du moulin, qui est dirigé suivant la même flèche f, se meuve au contraire suivant la direction perpendiculaire à la première indiquée par la flèche f'. Si, pendant que la surface MN passe dans la position M′ N′, une molécule d'air située d'abord en N peut parcourir précisément le chemin NM′, en vertu de sa vitesse propre, il est clair que cette molécule ne sera pas gênée par la surface MN, qu'elle ne fera que glisser le long de cette surface, et qu'en conséquence elle n'exercera sur elle aucune action. Pour que la surface MN puisse recevoir une pression de la part du vent, il faut que la vitesse des molécules d'air soit capable de leur faire parcourir un chemin plus grand que NM′, pendant que la surface MN passe à la position M′N′; on voit en effet que, dans ce cas, cette surface gênera le mouvement de l'air, et que, par suite, l'air réagira en tendant à accroître la vitesse de la surface qu'il rencontre. Si nous attribuons successivement à MN des vitesses de plus en plus grandes, pour une même vitesse du vent, cette surface mettra un temps de plus en plus petit pour passer à la position M′N′; pendant ce temps les molécules d'air parcourront, en vertu de leur vitesse propre, des chemins de plus en plus petits. Donc, pour que ces chemins surpassent toujours NM′, et que par conséquent le vent exerce toujours une pression sur la surface MN, il faut que NM′ soit de plus en plus petit, à mesure que MN marche plus vite; ou, en d'autres termes, il faut que MN s'approche de plus en plus d'être perpendiculaire à la direction du vent, ou bien à la direction de l'axe du moulin, qu'on suppose être la même. Or, les diverses parties d'une même aile, situées à des distances de plus en plus grandes de l'arbre tournant, sont précisément dans le cas que nous venons de supposer; elles marchent de plus en plus vite, et doivent cependant recevoir l'action d'une masse d'air qui a partout la même



Fig. 475.

vitesse : donc il faut que l'inclinaison de ces diverses parties sur la direction de l'arbre diminue en raison de l'augmentation de leur vitesse.

Le mouvement de rotation imprimé par le vent à l'arbre AB, fig. 474, se transmet au mécanisme intérieur du moulin, par l'intermédiaire d'une roue dentée D fixée à cet arbre, et d'une lanterne E avec laquelle engrène la roue D ; la lanterne est montée sur l'axe même de la meule courante F (§ 149). Toute la machine est portée par une forte pièce de bois verticale GH, autour de laquelle elle peut tourner comme sur un pivot. Un long levier K est fixé au moulin, et sert à l'orienter ; en appliquant une force de traction à l'extrémité de ce levier, on fait tourner tout le moulin autour de GH, et l'on amène ainsi l'arbre AB à être dirigé du côté d'où vient le vent. Pour faciliter cette manœuvre, on adapte souvent à l'extrémité du levier K, un petit treuil (§ 55) sur lequel s'enroule une corde, dont on fixe l'extrémité libre sur le sol, à une certaine distance. En faisant tourner le treuil, on tend à amener la corde pour l'enrouler sur son contour ; mais, comme son extrémité est fixe, et qu'elle ne peut pas céder à la force de traction qui lui est appliquée, c'est le treuil qui marche, en entraînant avec lui le levier K, et par suite le moulin.

L'appareil moteur d'un moulin à vent, composé de l'arbre AB, et des ailes C, C, est très souvent employé pour faire mouvoir d'autres mécanismes, tels que des scieries (§ 151), des vis hollandaises (§ 344), etc. On a conservé par extension le nom de *moulin à vent* à cet appareil en lui-même, quel que soit le genre de travail auquel il est employé.

§ 407. Lorsqu'un moulin à vent ne doit pas marcher, on serre les voiles, en les rapprochant de l'axe de chaque aile. De cette manière, les surfaces des ailes sont à jour, et ne donnent plus de prise au vent. Pour remettre la machine en mouvement, après avoir dirigé l'arbre moteur dans le sens du vent, il suffit d'écarter les voiles, afin de garnir de nouveau les ailes. Pour effectuer ces opérations, on amène successivement chaque aile au bas du chemin qu'elle parcourt en tournant, et on la maintient immobile dans cette position, pendant qu'on monte sur ses barreaux comme sur une échelle, soit pour tendre des voiles, soit pour les serrer. On parvient à maintenir les ailes dans l'immobilité, au moyen d'un frein analogue à celui que représente la figure 195 (page 185). Ce frein est formé d'un grand cercle de bois qui entoure la roue D, *fig.* 474 ; une de ses extrémités est fixe ; l'autre extrémité est attachée à un fort levier, qui, par son seul poids, suffit pour serrer le cercle sur le contour de la roue, et

pour s'opposer à ce qu'elle prenne le moindre mouvement. Pendant



Fig. 476.

la marche de la machine, ce levier est soulevé, et supporté par un crochet qui l'empêche d'agir sur le frein.

On voit que la manœuvre qui a pour objet de tendre ou de serrer les voiles qui couvrent les ailes d'un moulin, n'est pas très commode; elle exige un certain temps, et en outre elle expose celui qui l'exécute à des dangers assez grands, surtout lorsqu'il s'agit de soustraire rapidement le moulin à l'action d'un vent qui devient trop violent. D'un autre côté, on ne peut pas songer à serrer plus ou moins les voiles à chaque instant, suivant que le vent est plus ou moins fort; et cependant il serait bon de pouvoir le faire, pour ne pas fatiguer inutilement la machine, et pour éviter qu'elle ne prenne un mouvement trop rapide. C'est pour faire disparaître ces divers inconvénients, que M. Berton a imaginé récemment un système particulier d'ailes

[redacted]

sage se répand de plus en plus, et qui permet de faire volonté pendant la marche du moulin l'étendue des sur- i reçoivent l'action du vent. La *fig.* 476 représente la dis- qu'il a adoptée. L'arbre moteur du moulin est muni, comme moulins ordinaires, de quatre bras A, qui lui sont perpen- s, et qui doivent former les axes des ailes. Mais ces ailes, l'être des surfaces à jour que l'on recouvre de toiles à vo- nt formées d'un certain nombre de lattes C, qui se recou- partie, et qui déterminent ainsi une surface oblique à la de l'arbre du moulin. Ces lattes, qui ont une grande ana- ec celles dont se composent les jalousies, sont attachées, n de brides D, à des traverses E. Les traverses E sont elles- ixées en divers points des bras A, mais de manière à pou- rner autour de leurs points d'attache, et faire des angles moins aigus avec la direction des bras A. Les brides D sont nt mobiles autour de leurs points e avec les traverses E. Quatre trin- émaillère N sont liées à articulation de leurs extrémités aux premières s de chaque aile; elles engrènent s avec un même pignon denté, situé mité de l'arbre du moulin. Ce pi- t fixé à un axe de fer qui traverse dans toute sa longueur, et qui se , à l'autre bout de l'arbre, par une le à l'aide de laquelle on peut le urner facilement dans l'ouverture linale qui le contient. En agissant anivelle, on donne à l'axe qui la t au pignon fixé à l'autre extrémité te, un mouvement de rotation dans ou dans l'autre. Les crémaillères N ent ainsi tirées ou poussées d'une quantité; cela fait varier en con- e l'inclinaison des traverses E sur A, et il en résulte que les lattes C vrent plus ou moins, ou en d'autres que les ailes présentent une largeur moins grande. En faisant tourner velle d'une quantité suffisante, et sens convenable, on parvient même r *les lattes C à se* superposer complètement, en sorte que

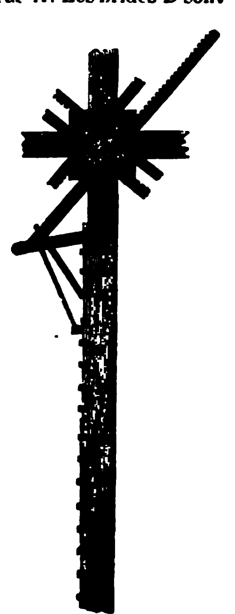


Fig. 477.

les ailes se présentent comme si elles étaient réduites à leurs bras, *fig.* 477.

On voit que l'élargissement ou le rétrécissement des ailes imaginées par M. Berton s'effectue avec la plus grande facilité de l'intérieur du moulin, et même pendant que la machine fonctionne. On peut donc sans peine, et aussi souvent qu'on le veut, mettre la largeur des ailes en rapport avec la vitesse du vent qui agit sur elles. Ce système d'ailes présente cependant un défaut : c'est que la surface de chaque aile est également inclinée sous la direction du vent dans toute sa longueur. D'après ce que nous avons dit, les parties extrêmes des ailes ne doivent recevoir que peu d'action de la part du vent, si toutefois elles en reçoivent. A égalité de surface, les ailes dont il s'agit doivent produire moins de travail que les ailes dont la surface est inégalement inclinée sur l'arbre en ses divers points.

On a reconnu que la marche d'un moulin à vent qui donne lieu à la production de la plus grande quantité de travail est celle pour laquelle le nombre de tours des ailes, en une minute, est double du nombre de mètres parcourus par le vent en une seconde.

EMPLOI DE LA VAPEUR COMME MOTEUR.

§ 408. Les machines à vapeur constituent un genre de moteurs dont l'usage encore récent est déjà extrêmement répandu, et tend à se répandre de plus en plus. C'est, sans contredit, de tous les moteurs connus, celui qui est le plus précieux pour l'industrie, en raison de la possibilité de l'employer partout, en lui donnant telle puissance qu'on veut, depuis la force d'un homme, jusqu'à la force de plusieurs centaines de chevaux-vapeur. Avant d'entrer dans la description des appareils à l'aide desquels on a pu utiliser la force de la vapeur d'eau, il est indispensable de rappeler les principales propriétés de cette vapeur, propriétés qui serviront de base à tout ce que nous aurons à dire des machines à vapeur.

§ 409. **Propriétés de la vapeur d'eau.** — Lorsqu'une certaine quantité d'eau est contenue dans un vase fermé, qu'elle ne remplit pas complétement, une portion de l'eau se réduit en vapeur, quelle que soit sa température. La vapeur ainsi formée se répand dans la partie de la capacité du vase qui n'est pas occupée par l'eau, soit que cette partie du vase ait été d'abord vide de toute matière, soit qu'elle contienne un gaz tel que de l'air atmosphérique. A mesure que la vapeur se forme, et s'accumule dans l'espace qui surmonte la masse d'eau, sa force élastique s'y accroît ; mais cette

ce élastique ne peut pas dépasser une certaine limite, qui dépend iquement de la température de l'eau. Dès que la vapeur a atteint tte limite, que l'on appelle sa *tension maximum*, il ne se pro-lit plus de nouvelle vapeur ; on dit alors que l'espace où elle se ouve est *saturé*. La présence d'une certaine quantité d'air dans space où se répand la vapeur n'a aucune influence sur la tension ximum dont nous venons de parler ; cet air n'influe que sur la idité avec laquelle la vapeur se forme. Si l'espace qui surmonte u est vide de toute matière, le liquide se vaporise avec une ra-ité extrême, et la vapeur acquiert presque instantanément sa sion maximum ; si au contraire cet espace contient de l'air, la eur ne se forme que peu à peu, et se répand de même dans la acité qui lui est offerte, en s'infiltrant pour ainsi dire entre les lécules de l'air. Dans ce dernier cas, la force élastique de l'atmos-ère gazeuse qui se trouve en contact avec l'eau est à chaque tant égale à la somme de la force élastique de l'air, et de celle de vapeur d'eau que l'air renferme.

Si le vase qui contient de l'eau est ouvert, de manière à commu-uer librement avec l'atmosphère, l'eau se vaporisera également ; is la vapeur formée, se répandant au dehors, ne pourra pas eindre la tension maximum qui convient à la température de u. et la vaporisation continuera indéfiniment, jusqu'à ce qu'il ne ste plus d'eau. La tension maximum de la vapeur est de plus en is grande, à mesure que la température est plus élevée ; la rapi é avec laquelle l'eau qui communique directement avec l'atmos-ère se réduit en vapeur croît également avec la température orsque la température est assez élevée pour que la tension maxi-um de la vapeur d'eau soit égale à la pression atmosphérique, vaporisation de l'eau s'effectue rapidement. Dans ce cas, la va-ur n'a plus besoin de s'infiltrer peu à peu dans les interstices mpris entre les molécules de l'air ; elle a la force de vaincre la ession exercée par l'atmosphère sur la surface de l'eau, et de pousser l'air pour se faire un passage au dehors. Des bulles de peur se forment alors dans toute la masse liquide, et viennent se ndre tumultueusement à la surface, pour se répandre dans l'at-osphère ; la masse d'eau est *en ébullition*. En général, l'eau se met ébullition toutes les fois que la tension maximum de la vapeur. orrespondant à sa température, n'est pas inférieure à la pression ue le liquide éprouve sur sa surface, de la part de l'atmosphère ui la surmonte, de quelque nature que soit cette atmosphère. u'elle soit formée de gaz, ou de vapeur, ou de l'un et de l'autre élangés dans une proportion quelconque.



l'on continue à la comprimer, sa force élastique n'au
elle restera égale à la tension maximum, et une
vapeur se condensera en repassant à l'état liquid
augmente l'espace dans lequel la vapeur peut se
provenant de la condensation repassera à l'état de v
tenant la force élastique égale à la tension maximum
tera encore du liquide: mais, à partir du moment
transformée tout entière en vapeur, une nouvelle
l'espace qui lui est offert sera accompagnée d'une
la force élastique de la vapeur, qui reprendra ain
des gaz.

§ 411. Si une masse de vapeur est contenue
dont les divers points ne sont pas à la même temp
élastique ne peut pas être supérieure à la tensio
correspond à la plus basse des températures des di
espace. On conçoit en effet que, s'il en était autr
élastique de la masse de vapeur devant être la mê
points, pour qu'il y ait équilibre, on aurait, au poi
ture est la plus basse, une certaine quantité de va
sion surpasserait la plus grande tension que puiss
en ce point, ce qui est impossible. Si, par une ci
conque, une masse de vapeur est mise en commu

[redacted]

reprises récemment par M. Regnault. Le tableau qui suit
xtrait des résultats obtenus par ce dernier savant; il fait
e la tension maximum de la vapeur d'eau, pour les tempé-
le 10 en 10 degrés, depuis 0° jusqu'à 230°. Les tensions
rimées par les hauteurs des colonnes de mercure auxquelles
nient équilibre.

E	TENSION de la vapeur.	TEMPÉRATURE.	TENSION de la vapeur.	TEMPÉRATURE.	TENSION de la vapeur.
	m		m		m
	0,0046	80°	0,3546	160°	4,6516
	0,0092	90°	0,5254	170°	5,9617
	0,0174	100°	0,7600	180°	7,5464
	0,0315	110°	1,0754	190°	9,4427
	0,0549	120°	1,4913	200°	11,6890
	0,0920	130°	2,0303	210°	14,3248
	0,1488	140°	2,7176	220°	17,3904
	0,2331	150°	3,5812	230°	20,9264

it par ce tableau que la tension maximum de la vapeur d'eau
ec la température, et qu'elle croît avec une rapidité qui
e de plus en plus, à mesure que la température s'élève. On
emarquer aussi que la tension maximum de la vapeur d'eau,
pérature de 100 degrés, est mesurée par une colonne de mer-
$0^m,76$, la même qui fait équilibre à la pression atmosphé-
rmale (§ 245); c'est ce qui doit avoir lieu, d'après ce que
ons dit il n'y a qu'un instant, relativement à l'ébullition,
la température de 100° est par définition celle de l'ébul-
l'eau, sous une pression mesurée par une colonne de mer-
$0^m,76$ de hauteur.

rce élastique de la vapeur, dans les machines à vapeur,
bituellement indiquée en atmosphères (§ 245), il est impor-
connaître la température pour laquelle la tension maximum
peur est égale à un nombre donné d'atmosphères. C'est
a que nous donnerons encore le tableau suivant, qui est dé-
résultats obtenus par M. Regnault, et qui contient les tem-
es correspondantes aux tensions de 1 à 28 atmosphères.

TENSION de la vapeur.	TEMPÉRATURE.	TENSION de la vapeur.	TEMPÉRATURE.
atm.	°	atm.	°
1	100,0	15	198,8
2	120,6	16	201,9
3	133,9	17	204,9
4	144,0	18	207,7
5	152,2	19	210,4
6	159,2	20	213,0
7	165,3	21	215,5
8	170,8	22	217,9
9	175,8	23	220,3
10	180,3	24	222,5
11	184,5	25	224,7
12	188,4	26	226,8
13	192,1	27	228,9
14	195,5	28	230,9

§ 413. Le passage de l'eau à l'état de vapeur exige une quant de chaleur considérable, qui est employée uniquement à produir changement d'état, sans que la température varie ; c'est ce que physiciens nomment la *chaleur latente de vaporisation*. Lors ensuite la vapeur se condense, et revient à l'état liquide, elle dég cette même quantité de chaleur, qui devient sensible par l'élé tion de température des corps avec lesquels cette vapeur est contact. Il résulte de là que plusieurs des phénomènes qui vien d'être indiqués ne se passent pas aussi simplement qu'on pour le croire au premier abord, par le motif que la vaporisation de l et la condensation de la vapeur sont toujours accompagnées d' tendance à un changement considérable de température.

Une masse d'eau qui se vaporise plus ou moins rapidemen qui n'est pas en communication avec une source de chaleur, épr nécessairement un abaissement de température. La tension m mum de la vapeur qui se forme au-dessus du liquide n'est donc celle qui correspond à la température qu'il avait tout d'abord ; est plus faible, en raison du refroidissement que le liquide épr à mesure que la vaporisation s'effectue. Une certaine quantité d' ayant une température de 100 degrés, se mettra en ébullition s communique librement avec l'atmosphère ; mais l'ébullition ce

ssitôt, parce que la température du liquide s'abaissera rapidement au-dessous de 100 degrés, par suite de la formation de la vapeur. Aussi, pour entretenir l'ébullition, est-il nécessaire de fournir nstamment de la chaleur à la masse d'eau ; et la quantité de vapeur qui se forme dans un temps donné est plus ou moins considérable, suivant que la chaleur que l'on restitue à l'eau dans le même mps est elle-même plus ou moins grande.

On conçoit d'après cela qu'il est très important de connaître la antité de chaleur que nécessite la vaporisation d'une masse d'eau terminée, et cela pour les diverses températures auxquelles on peut voir à effectuer cette vaporisation. C'est pour cela que nous donnons encore le tableau suivant, déduit, comme les deux autres, des recherches faites par M. Regnault sur les propriétés de la vapeur d'eau.

Température de la vapeur saturée.	CHALEUR latente.	CHALEUR totale.	Température de la vapeur saturée.	CHALEUR latente.	CHALEUR totale.
0°	606,5	606,5	120°	522,3	643,1
20°	592,6	612,6	140°	508,0	649,2
40°	578,7	618,7	160°	493,6	655,3
60°	564,7	624,8	180°	479,0	661,4
80°	550,6	630,9	200°	464,3	667,5
100°	536,5	637,0	220°	449,4	673,6

La deuxième colonne de ce tableau fait connaître la quantité de aleur nécessaire pour faire passer un kilogramme d'eau de l'état uide à l'état de vapeur à saturation, sans qu'il y ait de changeent dans la température, qui, après la vaporisation comme avant, t celle indiquée par la première colonne. La troisième colonne onne la quantité de chaleur nécessaire pour transformer un kiloamme d'eau, prise à la température de 0°, en vapeur saturée à la mpérature indiquée par le nombre correspondant de la première lonne. L'unité de chaleur est, comme on sait, la quantité de chaur nécessaire pour élever la température d'un kilogramme d'eau 0° à 1°.

§ 414. — **Historique de l'invention des machines à vapeur.** L'invention des machines à vapeur étant une des plus importantes i aient été faites dans les temps modernes, on a cherché naturellement à qui on devait en attribuer l'honneur. Nous allons indiquer *pidement les principaux* résultats de ces recherches historiques,

en prenant pour guide l'intéressante notice que M. Arago a publiée à ce sujet dans l'*Annuaire du bureau des longitudes*.

L'*éolipyle*, inventé par Héron d'Alexandrie, paraît être le premier exemple de l'emploi de la vapeur comme force motrice. Pour s'en faire une idée, il suffit de se reporter à l'appareil à réaction représenté par la *fig.* 447 (page 553). Dans cet appareil, l'écoulement de l'eau par des tuyaux convenablement recourbés détermine un mouvement de rotation du vase qui renferme le liquide. Si ce vase contenait de la vapeur au lieu d'eau, et que la force élastique de cette vapeur fût capable de la faire sortir avec une certaine vitesse par les tuyaux recourbés, il se produirait également un mouvement de rotation : tel est le principe de l'éolipyle. La disposition indiquée par Héron est un peu différente. Son appareil consiste en une boule métallique creuse, pouvant tourner autour d'un diamètre horizontal, et munie de deux tuyaux recourbés qui partent des extrémités d'un autre diamètre perpendiculaire au premier. Quoi qu'il en soit, la machine de Héron n'a rien de commun avec nos machines à vapeur, et ne peut pas même en être considérée comme une première ébauche; le mode d'action de la vapeur y est essentiellement différent.

Salomon de Caus, Français de naissance, est le premier qui ait indiqué (en 1615) la vapeur d'eau comme pouvant agir par pression pour produire l'élévation de l'eau. L'appareil qu'il décrit se compose d'un ballon de cuivre A, *fig.* 478, muni des deux tubes B, C, dont le premier B sert à l'introduction de l'eau, et le second C sert à la sortie du liquide sous l'action de la vapeur. Le tube B se termine par un entonnoir D, et est garni d'un robinet E. Lorsqu'on a versé de l'eau dans le ballon jusqu'au niveau F, on ferme le robinet E, et l'on place l'appareil sur un foyer. La vapeur qui se forme ne peut pas sortir par le tuyau B, qui est fermé; elle ne peut pas s'échapper non plus par le tuyau C, qui plonge dans l'eau, au-dessous du niveau F : elle acquiert donc, dans le haut du ballon, une tension de plus en plus grande, qui oblige l'eau à monter dans le tuyau C, et à sortir sous forme de jet.

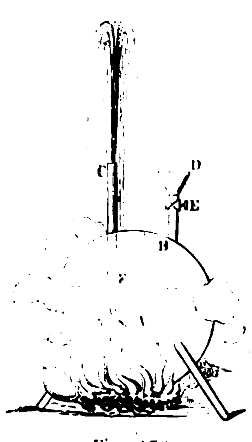


Fig. 478.

talien Branca a décrit (en 1629) une machine qui a beaucoup
.ogie avec l'éolipyle de Héron, quant au mode d'action de la
r. Un ballon A, *fig*. 479, dans lequel on introduit de l'eau, est
sur un ré-
. B; la vapeur
e s'échappe
a tuyau C, et
frapper les
es d'une roue
mouvement
tation de la
produit par
n de la va-
peut être
ué à la pro-
n d'un tra-
tile, par l'in-
diaire d'une
elle E, fixée
e des extré-
de son axe.
nachine de
a ne peut,
us que l'éo-
de Héron,
gardée com-
ant l'origine
nachines à
r.

Angleterre,
larquis de
ester a pu-
n 1663) un
ge dans le-
l parle d'un
qu'il a in-
pour élever
à l'aide du

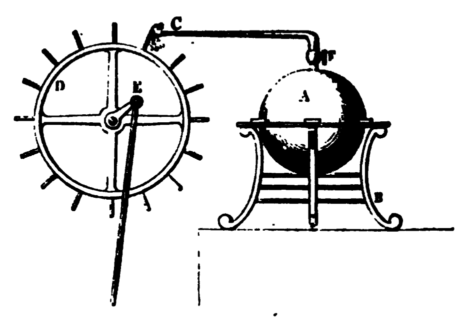


Fig. 479.

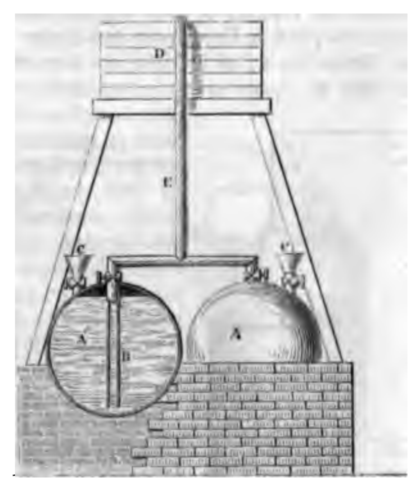


Fig. 480.

l se contente d'en donner une idée succincte, sans figure.
qui se trouve ici, *fig*. 480, a été disposée d'après la courte
ption qu'on lit dans son ouvrage. Deux chaudières sphériques
sont placées à côté l'une de l'autre dans un fourneau; deux

tuyaux B descendent dans chacune de ces chaudières, jusque près du fond, et sont destinés à l'ascension de l'eau qui y est contenue ; deux entonnoirs C, munis de robinets, servent à l'introduction de l'eau dans chaque chaudière ; un réservoir supérieur D est destiné à recevoir l'eau élevée par le tuyau E, auquel aboutissent les deux tuyaux B qui viennent des chaudières. Si l'on remplit d'eau l'une des chaudières, puis qu'on fasse du feu dessous, après avoir fermé le robinet de l'entonnoir C, et ouvert celui qui est au haut du tuyau B, l'eau sera poussée par la vapeur dans le tuyau E, et s'élèvera dans le réservoir D. Les deux chaudières doivent fonctionner alternativement. Cette machine est évidemment la même que celle de Salomon de Caus, avec un perfectionnement qui consiste dans l'emploi de deux chaudières au lieu d'une seule, et qui a pour but d'éviter les pertes de temps occasionnées par le remplissage des chaudières et l'échauffement de l'eau qu'on y a introduite.

§ 415. Dans les machines de Salomon de Caus et du marquis de Worcester, une partie de l'eau introduite dans les chaudières se réduisait en vapeur, et cette vapeur agissait par pression sur la surface du reste de l'eau, pour la refouler dans un tuyau d'ascension. Denis Papin, né à Blois, est le premier qui ait eu l'idée de faire agir la vapeur sur un piston destiné à recevoir sa pression, pour l'employer à vaincre une résistance. Voici en quoi consiste la machine proposée par Papin en 1690. Un cylindre A, *fig.* 481, fermé par le bas, et ouvert par le haut, contient un piston B qui peut se mouvoir dans toute sa hauteur. On n'introduit le piston dans le cylindre qu'après y avoir versé préalablement une petite quantité d'eau. Une ouverture C, pratiquée dans le piston, permet de l'abaisser jusqu'à ce que sa face inférieure touche l'eau contenue dans le cylindre, en laissant échapper l'air qui se trouve au-dessous de lui. Cela étant fait, on ferme l'ouverture C au moyen d'une tige M, et l'on fait du feu sous le fond du cylindre A. L'eau, s'échauffant de plus en plus, arrive bientôt à une température pour laquelle la tension maximum de la vapeur est capable de surmonter la pression atmosphérique (§ 409) ; alors le piston B, étant plus fortement pressé sur sa face inférieure que sur sa face supérieure, doit monter jus-

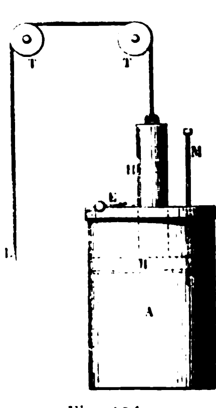


Fig. 481.

[redacted]

qu'au haut du cylindre. Si l'on arrête le piston dans cette nouvelle position, au moyen d'un cliquet E que l'on introduit dans une échancrure de la tige H, puis que l'on enlève le feu, le cylindre se refroidit, la vapeur qu'il contient se condense, et le piston n'est presque plus soumis qu'à la pression atmosphérique, dont une faible portion seulement est équilibrée par la vapeur qui reste encore. Il suffit alors de retirer le cliquet E, pour que le piston descende sous l'action de cette pression ; et si l'on suspendait un poids à la corde L, qui passe sur les poulies T, et qui vient s'attacher à la tige H du piston, ce poids pourrait être élevé par le mouvement ainsi produit. On pourrait d'ailleurs recommencer la même opération, autant de fois qu'on voudrait, avec la même quantité d'eau.

Cette machine a été essayée en petit par Papin. On y voit le principe de la machine atmosphérique, dont nous parlerons bientôt.

§ 416. Le capitaine Savery (en 1689) est l'auteur de la première machine qui ait été appliquée en grand pour l'élévation de l'eau. Cette machine a beaucoup d'analogie avec celles que Salomon de Caus et le marquis de Worcester avaient indiquées précédemment, mais elle en diffère en ce que la vapeur n'est pas formée par une portion de l'eau à élever, mais par une masse d'eau séparée qui est seule soumise à l'action d'un foyer. Un fourneau A, *fig*. 482, con-

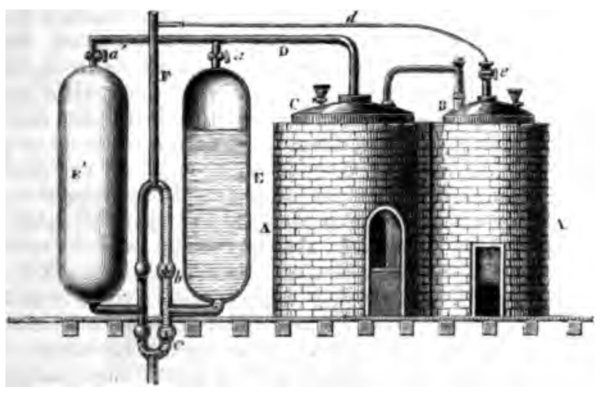


Fig. 482.

tient deux chaudières fermées B, C, qui communiquent l'une à l'autre. La vapeur qui se forme dans ces chaudières se rend dans le *tuyau D, et peut passer* de là dans l'un ou l'autre des récipients E, E',

suivant qu'on ouvre le robinet a, ou le robinet a'. Ces récipients étant pleins d'eau, on conçoit que, au moment où l'on ouvre le robinet a, la vapeur presse l'eau contenue en E, et la fait monter par le tuyau d'ascension F, en ouvrant la soupape b. Lorsque le récipient E est vide, on ferme le robinet a, et l'on ouvre le robinet a' : c'est alors l'eau du récipient E' qui est refoulée dans le tuyau d'ascension F. Pendant ce temps, le récipient E se refroidissant, la vapeur qu'il contient se condense, et le vide ainsi formé détermine l'élévation de l'eau du réservoir inférieur, qui ouvre la soupape c, et vient remplir de nouveau le récipient E. On voit donc qu'il suffit d'ouvrir et de fermer alternativement les robinets a, a', pour que la machine fonctionne. Un tuyau d, qui s'embranche en un point du tuyau d'ascension F, vient aboutir à l'une des chaudières, et est habituellement fermé par un robinet e ; ce tuyau sert à remplir les chaudières d'eau, lorsqu'elles se sont vidées par la production de la vapeur.

Dans cette machine de Savery, l'eau qu'il s'agit d'élever n'est pas contenue dans les chaudières, comme cela avait lieu dans celles de Salomon de Caus et de Worcester, mais elle ne s'en échauffe pas moins. Aussitôt que la vapeur est mise en communication avec l'un des récipients E, E', elle se condense au contact de cette eau qui est froide ; de nouvelles quantités de vapeur, arrivant constamment des chaudières, se condensent de même en réchauffant l'eau du récipient ; et ce n'est que lorsque cette eau est suffisamment chaude pour permettre à la vapeur de conserver la force élastique nécessaire à l'élévation de l'eau dans toute la hauteur du tuyau d'ascension F, que cette élévation commence, et que le récipient se vide.

Pour faire disparaître ce défaut grave de la machine de Savery, Papin imagina, en 1707, de ne faire agir la vapeur par pression sur l'eau à élever que par l'intermédiaire d'un piston flottant sur cette eau, ainsi qu'on le voit sur la *fig.* 483. Une chaudière sphérique communique, par un tuyau L, avec un cylindre I qui doit alternativement se remplir et se vider d'eau. Un robinet C permet d'établir et d'intercepter à volonté cette communication. Le piston H contient des parties creuses N qui lui permettent de flotter sur l'eau ; ce piston reçoit la pression de la vapeur sur sa face supérieure, et la transmet au liquide. Les soupapes B, E, servent, l'une à l'entrée de l'eau dans le cylindre I, l'autre à sa sortie de ce cylindre. On voit, au sommet de la chaudière, une soupape sur laquelle s'appuie un levier D, chargé d'un poids F à son extrémité libre : c'est la *soupape de sûreté*, dont Papin est l'inventeur, et qui a pour objet de s'opposer à ce que la vapeur ne prenne une trop forte tension dans la

chaudière; on en voit encore une autre G au haut du cylindre I. Nous avons déjà vu une soupape de ce genre dans la presse hydrau-

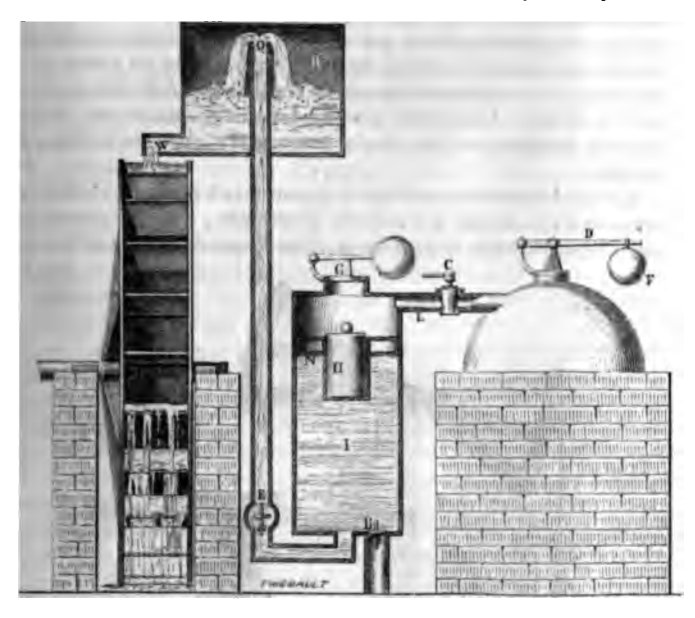


Fig. 483.

lique (§ 371); mais ce n'est qu'une imitation de la soupape de sûreté des chaudières à vapeur, qui était employée depuis longtemps, lorsque la première presse hydraulique a été construite.

Papin ne s'est pas contenté d'ajouter un piston flottant à la machine de Savery : il a voulu que sa machine, au lieu de servir uniquement à élever de l'eau, pût devenir un moteur capable de faire mouvoir tels mécanismes qu'on voudrait. Pour cela il faisait déboucher son tuyau d'ascension, en Q, dans une caisse R, fermée de toutes parts, excepté en W, où se trouvait une ouverture permettant au liquide de s'écouler pour tomber sur une roue hydraulique : l'eau sortait de la caisse R avec une vitesse qui était beaucoup augmentée par la compression de l'air situé au-dessus d'elle, et faisait ainsi tourner la roue, en agissant à la fois par sa vitesse et par *son poids*.

Savery avait annoncé sa machine comme pouvant servir à l'é[ ]sement des eaux des mines; mais elle ne pouvait pas élever eaux à une hauteur un peu grande, sans qu'il en résultât des inc[ ]vénients de plus d'un genre, par suite de la forte tension que de[ ] prendre la vapeur. Les fuites de la vapeur à travers les joints d[ ] machine, et les explosions des chaudières, étaient difficiles à év[ ] à cette époque. Aussi cette machine fut-elle peu employée. D'[ ]leurs la modification que Papin proposa d'y apporter ne fut adoptée.

§ 417. Le première machine à vapeur qui ait rendu de vérita[ ] services à l'industrie, est celle de Newcomen, qui est habitu[ ]ment désignée sous le nom de *machine atmosphérique*. Cette [ ]

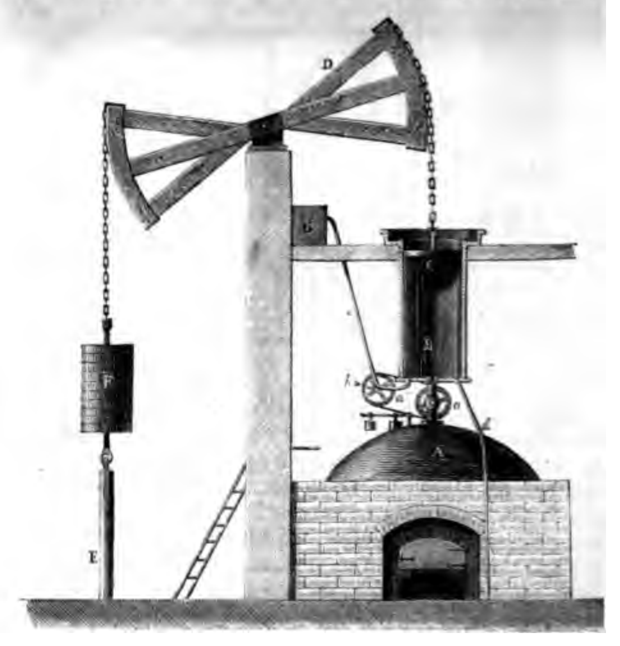


Fig. 484.

chine date de 1705. Elle n'est à proprement parler que la réalis[ ] de l'idée émise par Papin en 1690 (§ 415).

La *fig*. 484 fait connaître la disposition de cette machine

[redacted]

nployée à l'épuisement des eaux des mines, et qui l'est même e dans certaines localités. Une chaudière A est destinée à la action de la vapeur; elle a la forme d'un hémisphère terminé eurement par un fond plat, et est munie d'une soupape de é. La vapeur formée dans la chaudière peut se rendre dans le dre B par un tuyau qui les réunit. Un robinet, dont la tête rmée d'une espèce de roue *a*, est adapté à ce tuyau, et permet blir et d'intercepter alternativement la communication de la dière avec le cylindre. Le piston C, mobile dans le cylindre B, ttaché par une chaîne à l'une des extrémités d'un balancier D, peut tourner autour de son milieu. L'autre extrémité de ce ncier supporte, au moyen d'une chaîne, une longue tige E, qui end dans un puits de mine, et qui est destinée à y faire mou- des pompes : c'est la maîtresse tige dont nous avons parlé à asion des pompes de mines (§ 361).

rsque le robinet *a* est ouvert, la vapeur presse le piston C de en haut, et fait équilibre à la pression atmosphérique qui rce sur sa face supérieure; la tige E peut alors descendre, en de son poids et du poids additionnel F, en faisant remonter ton C jusqu'au haut du cylindre B. Si l'on vient alors à fermer binet *a*, et à déterminer par un moyen quelconque la conden- n de la vapeur contenue en B, la pression atmosphérique, qui ur la face supérieure du piston C, n'est plus contre-balancée tension de la vapeur; le piston redescend alors, et soulève la tige E. Cette seconde partie du mouvement du piston C donner lieu à la production d'une quantité de travail aussi le qu'on veut; il suffit pour cela que la surface de ce piston s dimensions convenables.

ur opérer la condensation de la vapeur dans le cylindre B, on oyait d'abord un moyen dont s'était déjà servi Savery, et qui stait à faire tomber de l'eau froide sur la surface extérieure lindre. Mais ce moyen n'agissait que lentement. Un jour on rçut que la condensation se produisait avec une rapidité beau- plus grande qu'à l'ordinaire. En cherchant à se rendre compte fait, on reconnut qu'il était dû à la présence de l'eau qu'on ait sur le piston, pour s'opposer au passage de l'air ou de la va- entre son contour et les parois du cylindre. Une partie de eau passait par un petit trou dont le piston était accidentelle- percé, et tombait par gouttelettes dans l'espace rempli de ır; de là la condensation rapide qu'on observait. On mit à profit sultat important, et, à partir de ce moment, on n'opéra plus la nsation qu'au moyen d'une injection d'eau froide faite à l'in-

térieur de la capacité contenant la vapeur à condenser. A cet effet, un tuyau c, amenant l'eau froide d'un réservoir G, débouche au fond du cylindre. Un robinet muni d'une roue a' est adapté à ce tuyau, et permet de produire et d'interrompre à volonté l'injection d'eau froide. Une chaîne sans fin embrasse les deux roues a, a', et fait qu'elles ne peuvent pas tourner l'une sans l'autre. Une manivelle b, liée à la roue a', permet de faire tourner ces deux roues en même temps. Dans la position actuelle, le robinet a est fermé, le robinet a' est ouvert, et l'eau froide du réservoir G peut se rendre dans le cylindre B, pour y produire la condensation de la vapeur. Lorsque le piston C est arrivé au bas de sa course, il suffit de faire tourner la manivelle b en l'abaissant, pour fermer le robinet a' et ouvrir le robinet a. Alors le piston C remonte ; on ramène la manivelle dans sa première position, le piston C redescend, et ainsi de suite. Une ouverture pratiquée au bas du cylindre B communique avec un tuyau d destiné à évacuer l'eau qui s'accumule constamment au fond du cylindre ; de temps en temps on fait sortir cette eau, en ouvrant un robinet adapté au tuyau d.

§ 418. Dans la machine atmosphérique, la vapeur n'a pas d'autre objet que de faire équilibre à la pression atmosphérique ; aussi sa tension ne doit-elle pas dépasser une atmosphère. Mais en employant la vapeur de cette manière, il faut absolument opérer sa condensation, ce qui exige qu'on ait à sa disposition une assez grande quantité d'eau. Si, au lieu de cela, on fait agir la vapeur sur un piston, en lui donnant une force élastique supérieure à celle de l'air atmosphérique, on pourra obtenir un effet analogue à celui que fournit la condensation, c'est-à-dire diminuer la tension de la vapeur, en la faisant communiquer librement avec l'atmosphère. Tel est le principe des machines dites *à haute pression, sans condensation*.

Papin est le premier qui ait construit une machine de ce genre. Leupold, qui l'a fait connaître en 1724, en a décrit une du même genre qui est représentée ici, *fig.* 485. Une chaudière A, destinée à la production de la vapeur, est surmontée de deux cylindres R, S, avec lesquels elle communique alternativement. Un robinet B, placé sur le passage de la vapeur, permet de la conduire, tantôt dans le cylindre R, tantôt dans le cylindre S ; ce robinet fait en même temps communiquer avec l'atmosphère, par le conduit M, celui des deux cylindres qui ne reçoit pas de vapeur de la chaudière. Dans la position qu'indique la figure, la vapeur de la chaudière va en R, et celle qui était en S a pu s'échapper dans l'atmosphère ; en faisant tourner le robinet B d'un angle droit, on fera passer la vapeur de la chaudière en S, et celle qui s'est rendue en R pourra se répandre

s l'atmosphère. Les pistons C, D, sont reliés par les tiges E, F, aux balanciers G, H ; ces balanciers sont articulés d'une autre : aux tiges K, L, de deux pompes foulantes O, P, qui puisent

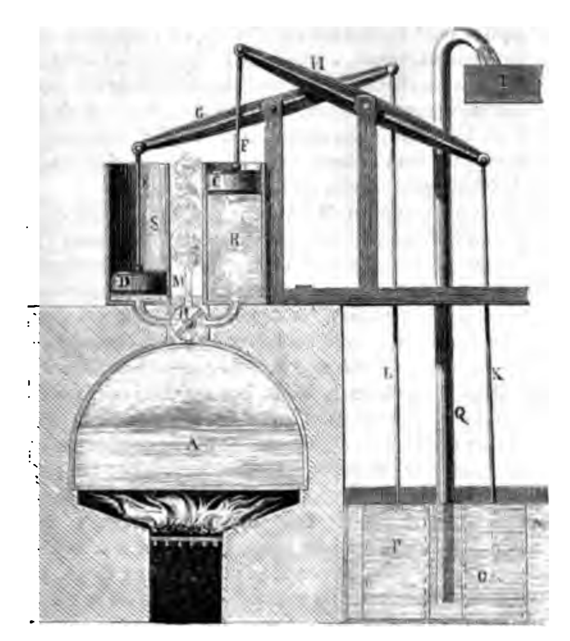


Fig. 485.

u dans un réservoir N, et l'élèvent par un tuyau Q jusque dans second réservoir T. Chacun des pistons C, D, est poussé du bas haut du cylindre qui le contient, lorsqu'il est soumis à l'action la vapeur de la chaudière ; et en même temps il abaisse le piston la pompe correspondante, en foulant de l'eau dans le tuyau Q. sque ensuite la vapeur qui est au-dessous de ce piston peut chapper par l'ouverture M, il est également pressé sur ses deux es, et redescend en vertu de son poids, qui l'emporte sur les istances à vaincre.

§ 419. **Machine à vapeur de Watt à simple effet.** — Ce e nous avons dit dans les paragraphes précédents peut donner e *idée de la marche progressive* qu'a suivie l'emploi de la vapeur



même temps que nous donnerons la descripti
simple et à double effet, telles qu'il les a dispos

La machine à vapeur de Watt à simple eff
pour remplacer la machine atmosphérique de N
Elle se compose principalement, comme la mach
d'un cylindre dans lequel un piston se meut
bas en haut et de haut en bas. La tige de ce pi
reliée à l'une des extrémités d'un balancier, qu
mouvement de va-et-vient à une tige de pompe
extrémité. Dans la machine de Watt, comme da
men, le piston doit monter dans le cylindre par
poids de la tige de pompe, action qui lui est tra
médiaire du balancier; et le mouvement descen
doit être produit par la différence des pressions
sa face supérieure et sur sa face inférieure.
pression sur les deux faces du piston, penda
ascendant, et la différence de pression sur ces d
son mouvement descendant, ne sont pas obtenue
nière dans les deux machines.

Le piston A, de la machine de Watt, *fig.* 186
cylindre BB qui est fermé à ses deux extrémités
C, D, existent au haut et au bas de ce cylindre,

des moments convenables. Les soupapes G et K étant a soupape H fermée, la vapeur qui vient de la chau-
nd librement du cylindre, re C, et peut ' sa pression upérieure du même temps i s'était pré- ıtroduite sous rouve en com- directe avec r, par la sou- par suite elle r qu'une très ı (§ 441). Le ıe descendre, la différence exercées sur es est capa- re les résis- ı sont appli- ıoment où le ve au bas du erme les sou- ; l'on ouvre la alors le haut ylindre com-

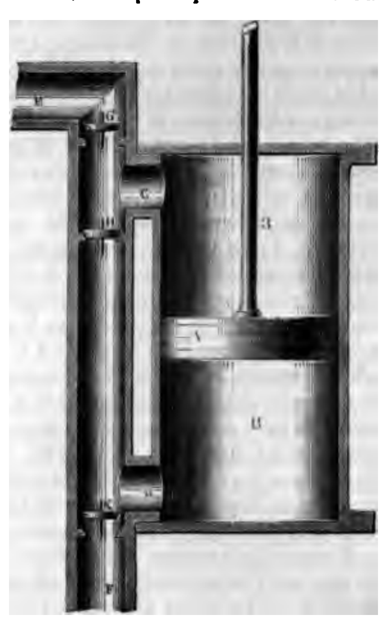


Fig. 486.

ın avec l'autre; tandis que leur communication est soit avec la chaudière, soit avec le condenseur. Le ve donc également pressé sur ses deux faces, et il difficulté, sous l'action de la tige de pompe qui est autre extrémité du balancier. Le piston A étant ar- e sa course, il suffit de fermer la soupape H, et d'ou- autres, pour que le mouvement descendant du piston Les trois soupapes G, H, K, sont habituellement s des noms spéciaux, qui rappellent l'objet de chacune il est bon de connaître : G est la *soupape d'admis-* ı *soupape d'équilibre ;* K est la *soupape d'exhaustion.* e soupape, qui laisse pénétrer un jet d'eau froide dans , s'ouvre et se ferme en même temps que la soupape

§ 420. L'emploi d'un condenseur, c'est-à-dire d'une capacité séparée dans laquelle doit s'opérer la condensation de la vapeur par une injection d'eau froide, constitue la plus importante des inventions de Watt. Pour se convaincre de son importance, il suffit d'examiner ce qui se passe dans la machine de Newcomen. Au moment où le piston est arrivé en haut de sa course, on détermine une injection d'eau froide dans le cylindre, pour y condenser la vapeur, et faire redescendre le piston. Mais cette eau froide abaisse en même temps la température des parois du cylindre, et elle l'abaisse d'une quantité considérable. Lorsque ensuite on veut faire remonter le piston, on fait arriver de nouvelle vapeur de la chaudière dans le cylindre. Cette vapeur, se trouvant en contact avec des parois refroidies, se condense aussitôt; et ce n'est que lorsque la température de ces parois s'est suffisamment élevée par cette condensation, que la vapeur conserve dans le cylindre une force élastique assez grande pour faire équilibre à la pression atmosphérique, et pour permettre au piston de remonter. On voit par là que le réchauffement des parois du cylindre, à chaque coup de piston, dépense en pure perte une grande quantité de vapeur; et l'on comprend toute l'importance qu'il y avait, sous le rapport de l'économie du combustible consommé, à faire disparaître ce grave défaut de la machine de Newcomen. Watt y est parvenu de la manière la plus heureuse, par l'emploi d'un condenseur séparé.

L'emploi de la vapeur, pour presser la face supérieure du piston, au lieu de l'air atmosphérique, permet d'exercer une plus forte pression sur un même piston. Il suffit pour cela de faire en sorte que la vapeur formée dans la chaudière prenne une force élastique supérieure à celle de l'air atmosphérique. Il en résulte que, pour construire une machine d'une puissance déterminée, il n'est pas nécessaire de donner au cylindre des dimensions aussi grandes que celles qu'on devrait lui donner, si l'on adoptait la disposition des machines de Newcomen.

Les machines de Watt à simple effet sont encore employées dans quelques localités. On en voit à Paris, dans les établissements publics connus sous les noms de *pompe à feu du Gros-Caillou*, et *pompe à feu de Chaillot;* elles servent à élever les eaux de la Seine pour le service de la ville. Cependant nous nous contenterons d'en avoir indiqué le principe, sans entrer dans le détail de leur disposition. Nous décrirons de préférence une des machines à simple effet que l'on construit maintenant, surtout dans le comté de Cornouailles (Angleterre), pour l'épuisement des eaux des mines, et qui ne sont autre chose que des machines à simple effet de Watt, auxquelles on

[redacted]

·té de notables perfectionnements. Mais avant de nous oc-
le cette description, il est indispensable d'expliquer ce que
tend par la *détente de la vapeur*.

!I. **Détente de la vapeur.** — Nous avons dit que, dans la
ie de Watt, *fig*. 486, la soupape d'admission G reste ouverte
t tout le temps que le piston met à descendre. Pendant ce
la vapeur passe librement de la chaudière dans le cylindre :
rs l'ébullition de l'eau dans la chaudière fournit à chaque
une quantité de vapeur capable de remplacer celle qui s'en
en résulte que la face supérieure du piston est toujours pres-
la même manière. Supposons maintenant que la soupape G
e ouverte que pendant une partie de la course descendante
on. Dès le moment qu'elle sera fermée, la quantité de vapeur
ne dans la partie supérieure du cylindre ne pourra plus aug-
. Cependant celle qui s'y trouve continuera à presser le pis-
i le faire descendre ; mais en même temps elle se dilatera, et
e élastique diminuera en conséquence de plus en plus, ce qui
chera pas qu'elle n'amène le piston jusqu'au bas du cylindre,
ichine est convenablement disposée. Dans la première partie
vement descendant du piston, tant que la soupape d'admis-
est ouverte, on dit que la vapeur agit *à pleine pression* ; à
u moment où la soupape d'admission est fermée, on dit que
ur agit *avec détente*.

ons maintenant quel avantage il peut y avoir à faire agir la
avec détente, dans une portion de la course du piston, au
la faire agir constamment à pleine pression. Supposons, pour
s idées, que la soupape d'admission se ferme au moment où
n est au milieu de sa course. Il est bien clair que, dans ce
vapeur ne pourra pas produire autant d'effet que si elle agis-
leine pression pendant toute la course du piston. Mais aussi
tité de vapeur employée ne sera que la moitié de ce qu'elle
été dans ce cas ; la dépense en combustible devra donc être
ent réduite de moitié, puisque, toutes choses égales d'ailleurs,
tité de combustible consommée est évidemment proportion-
la quantité de vapeur produite. Pour s'assurer s'il y a avan-
aire agir la vapeur avec détente, il suffit donc de s'assurer si,
moyen, on réduit la dépense dans un plus grand rapport que
roduit. Or c'est ce que nous reconnaîtrons sans peine. Car
itité de travail (§ 76) effectuée par l'action de la vapeur sur
n, pendant la première moitié de sa course, c'est-à-dire
t que la soupape d'admission est ouverte, est précisément
a moitié de celle qui aurait été effectuée par la vapeur agis-



avantage réel. Si l'on veut effectuer le même travai
chine à détente qu'avec une machine où la vapeur
pleine pression, il suffira de faire le cylindre de la
grand que celui de la seconde, dans un rapport d
degré de détente que l'on veut produire ; et la pre
tout en étant aussi puissante que l'autre, exigera m
ou, ce qui revient au même, il faudra moins de co
lui fournir la vapeur nécessaire à sa marche.

Pour qu'on se fasse une idée nette de l'avantage
l'emploi de la vapeur avec détente, nous allons don
des quantités de travail qu'une même masse de vap
tuer, suivant qu'on la fait agir en la détendant plus
concevoir comment ces quantités de travail peuven
faut se représenter le piston soumis à des pressi
plus faibles pendant que la vapeur se détend, et i
durée totale de la détente soit décomposée en un très
de petites portions, pendant chacune desquelles la
être regardée comme constante ; en multipliant la p
respond à chacun de ces intervalles de temps par
parcourt le piston pendant ce temps (§ 76), et faisa
tous les produits ainsi obtenus, on aura la quantité d
tuée pendant la détente. Il suffira d'ajouter à cette s
effectué par la vapeur avant que la détente commen

[redacted]

FRACTION le la course commence la détente	TRAVAIL produit.	FRACTION de la course où commence la détente.	TRAVAIL produit.
1	1,000	0,5	1,693
0,9	1,105	0,4	1,916
0,8	1,223	0,3	2,204
0,7	1,357	0,2	2,609
0,6	1,509	0,1	3,302

'idée de faire agir la vapeur avec détente est due à Watt. Mais i'est que postérieurement à lui qu'on en a fait l'application come dans la construction des machines à vapeur.

§422. **Machine à vapeur de Cornouailles.** — La machine qui actuellement employée dans le comté de Cornouailles, pour l'épuiient des eaux des mines, est, ainsi que nous l'avons déjà dit, la chine à simple effet de Watt, à laquelle on a apporté de notables fectionnements, parmi lesquels on doit placer au premier rang nploi de la détente. La *fig.* 487 représente l'ensemble d'une mane de ce genre. Le piston moteur se meut à l'intérieur du cylre A. Sa tige B est articulée en C à l'une des extrémités d'un ancier CDE. Le mouvement de va-et-vient du piston donne lieu n mouvement d'oscillation du balancier autour de son axe D, et suite à un mouvement de va-et-vient de la tige F suspendue à itre extrémité de ce balancier. La tige F descend dans toute la fondeur d'un puits de mine, et doit y faire mouvoir des pompes ; n'est autre chose que la maîtresse tige dont nous avons parlé à casion des pompes de mines (§ 361). L'action de la vapeur n'a d'autre objet que de soulever la tige F ; cette tige, en retomit ensuite sous l'action de son poids, produit le refoulement de u du puits dans les tuyaux d'ascension correspondant aux divers ges de pompes.

On comprendra aisément que, dans une machine de ce genre, nploi de la vapeur avec détente ne doit pas seulement occainer une économie de combustible ; il en résulte encore un avane important pour la marche de la machine. La résistance à vainagit avec une intensité constante, pendant tout le temps de la scente du piston moteur. Si la vapeur agissait à pleine pression, qu'à ce que le piston fût arrivé au bas de sa course, il en résul-ait que la puissance resterait également constante pendant tout

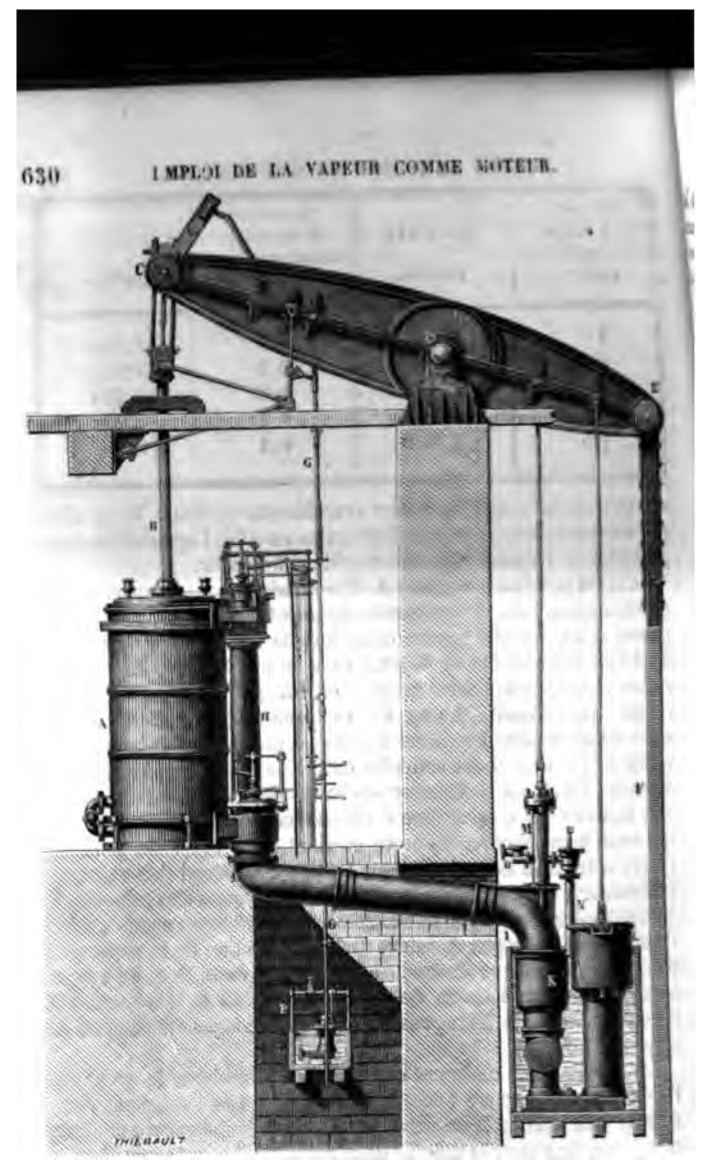


Fig. 187.

ce temps. Or, la puissance doit l'emporter sur la résistance au commencement du mouvement descendant du piston, afin de pouvoir

r donner une certaine vitesse, ainsi qu'aux diverses parties de la achine qui se meuvent en même temps que lui; donc la puissance mporterait toujours de même sur la résistance pendant toute course du piston, et, par suite, le mouvement de la machine accélérerait constamment; donc enfin il en résulterait un oc du piston contre le fond du corps de pompe, choc qu'on doit iter à cause des inconvénients de plus d'un genre qu'il occasionne. emploi de la vapeur avec détente permet de faire disparaître ce oc. On conçoit, en effet, que la pression exercée par la vapeur ir le piston étant d'abord constante, et allant ensuite en diminant progressivement, pourra l'emporter pendant quelque temps ir la résistance à vaincre, puis bientôt devenir trop faible pour lui ire équilibre; le mouvement du piston s'accélérera donc d'abord, our se ralentir ensuite (§ 131); et, en conséquence, il pourra se faire ue le piston n'arrive au bas de sa course qu'avec une vitesse nulle u presque nulle.

La machine fait mouvoir d'elle-même les divers mécanismes nécessaires à sa marche. Une longue tige GG, qui est liée au balanier, et que l'on nomme la *poutrelle*, sert à ouvrir et fermer en emps convenable les soupapes d'admission, d'équilibre, et d'exhausion, ainsi que nous l'expliquerons bientôt. Le tuyau H sert à faire communiquer le haut et le bas du cylindre A, par l'ouverture de la soupape d'équilibre, afin de permettre au piston de remonter sous l'action du poids de la tige F. Le tuyau II fait communiquer le bas du cylindre avec le condenseur K, lorsque la soupape d'exhaustion est ouverte. Le condenseur est une capacité fermée qui se trouve au milieu d'une bâche contenant de l'eau froide, et dans laquelle l'eau de la bâche pénètre constamment, sous forme de jet, par une ouverture pratiquée à cet effet.

Une pompe L, dont le piston est attaché par une longue tige au balancier CDE, sert à retirer du condenseur l'eau qui s'accumule constamment à sa partie inférieure, et qui vient, soit de l'eau d'injection, soit de la vapeur condensée. A chaque coup du piston de la pompe L, la totalité de l'eau du condenseur en est retirée, et, en outre, ce piston agit vers la fin de sa course en aspirant une partie de l'air contenu dans le tuyau I et dans le condenseur K : c'est ce qui fait que la pompe L porte le nom de *pompe à air*. Si cette pompe ne retirait du condenseur que l'eau qui y arrive constamment, il s'y accumulerait des quantités d'air de plus en plus grandes, ce qui ferait que bientôt la pression dans le condenseur ne serait pas inférieure à la pression atmosphérique; et dès lors la condensation de la vapeur deviendrait inutile, puisqu'on



Fig. 488.

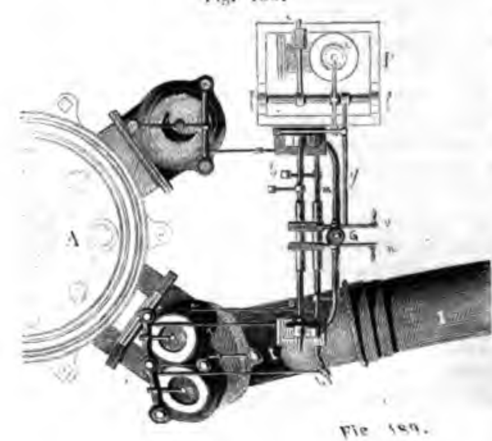


Fig. 489.

arriverait au même résultat en la faisant dégager librement dans l'atmosphère. Cet air, que l'on a besoin de retirer du condenseur, y est amené en partie par l'eau d'injection qui en contient en dissolution, et en partie par la vapeur qui entraîne avec elle celui qui était en dissolution dans l'eau introduite dans les chaudières.

Une autre pompe M, mue également par la machine, prend, par le tuyau N, une portion de l'eau chaude que la pompe à air retire du condenseur, et la refoule dans les chaudières, par un tuyau qui s'embranche en O. Cette eau est destinée à remplacer constamment celle qui sort des chaudières sous

[redacted]

ne de vapeur, afin d'y maintenir toujours une même quantité u. La pompe M est désignée sous le nom de *pompe alimentaire*.

423. Voyons maintenant de quelle manière les soupapes peu t être alternativement ouvertes et fermées par la machine elle-ne. Pour cela nous nous servirons des *fig*. 488 et 489 dont la mière est la reproduction, à une plus grande échelle, de la partie a *fig*. 487, où se trouvent les mécanismes que nous voulons dé-e, et la seconde est un plan de cette même partie de la ma-ne.

On voit en Q une capacité cylindrique dans laquelle est située premiére soupape destinée à modérer plus ou moins le passage la vapeur de la chaudière dans le cylindre, suivant que la résis-ice à vaincre par l'action de la vapeur est plus ou moins grande. tte soupape, que l'on nomme *soupape modératrice*, ne doit pas uvrir ni se fermer pendant la marche de la machine: elle doit iserver constamment la position qu'on lui a donnée tout d'abord, ir que le mouvement descendant du piston ne s'effectue ni trop tement ni trop rapidement. La tige *a* de cette soupape traverse ond supérieur de la boîte Q qui la contient; un levier *bc*, fixé axe *c*, permet de faire tourner cet axe sur lui-même, et de sou-er plus ou moins la tige *a*, au moyen d'un autre levier que porte nême axe; enfin une tringle *dd*, articulée à l'extrémité du levier s'abaisse jusqu'à la portée du conducteur de la machine, qui t faire monter ou descendre son extrémité inférieure, de manière onner une ouverture convenable à la soupape modératrice.

C'est en *z*, au-dessous de la boîte Q, que s'embranche le tuyau amène la vapeur de la chaudière dans la machine. La vapeur verse donc de bas en haut l'ouverture de la soupape modératrice. là elle se rend dans la boîte R de la soupape d'admission, qui placée à côté de la précédente, et pénètre dans le haut du cy-lre, lorsque cette soupape est ouverte. Après avoir agi sur le ton pour le faire descendre, elle sort du haut du cylindre A par boîte S de la soupape d'équilibre, située au haut du tuyau H, et rend par ce tuyau dans le bas du même cylindre, pendant que piston remonte. Enfin la soupape d'exhaustion située en T vient s'ouvrir, et la vapeur passe du cylindre dans le tuyau H qui la ène au condenseur.

Lorsque le piston est sur le point de descendre, il faut que la upape d'exhaustion s'ouvre d'abord, puis que la soupape d'ad-ission s'ouvre quelques instants plus tard, pour que, dans l'inter-lle, la vapeur contenue dans le bas du cylindre ait le temps de se ndenser en grande partie. Le piston ayant déjà parcouru une frac-



soupapes d'exhaustion et d'admission en même
la soupape d'équilibre, c'est-à-dire au moment
la fin de sa course ascendante: par cette disposi
cendrait immédiatement, et la machine fonctio
nière continue. Mais, au lieu de cela, on a ch
mouvement du piston d'une manière intermitte
laisser la machine en repos pendant un temps
après chaque double course descendante et asc
C'est la nature du travail spécial qu'effectuent
nous nous occupons, qui a conduit à produire
dans leurs mouvements. Les pompes mues par
doivent épuiser l'eau contenue dans le puits, à
rive par les fissures du terrain, et par les galer
aboutissent au puits; on conçoit donc que ces
besoin de fonctionner constamment, mais que le
vent donner pendant chaque heure qu'un nom
sur la quantité d'eau qui se rend pendant ce
puits.

Pour arriver à produire ce mouvement interm
à vapeur, on ne fait pas ouvrir les soupapes d'
mission par la machine elle-même, mais par
que l'on voit en P, *fig.* 487 et 489, et auquel

[redacted]

oumis à l'action de la poutrelle GG, et il tend à redescendre tu de son poids, et aussi en vertu du contre-poids *i* fixé à ier qui fait corps avec l'axe *ff*. Mais l'eau qui s'est intro-lans le corps de pompe de la cataracte ne peut en sortir que ie ouverture qu'on rend à volonté plus ou moins étroite; il ulte que le piston ne peut descendre que lentement, en fai-rtir l'eau par cette ouverture. Le levier *g* se relève donc aussi ent. C'est ce mouvement ascendant du levier *g* que l'on pour ouvrir en temps convenable les soupapes d'exhaustion dmission, afin de faire donner à la machine à vapeur un u coup de piston. On conçoit dès lors que l'on peut régler à ṡ l'intervalle de temps qui s'écoule entre deux coups de piston sifs de la machine, en rétrécissant plus ou moins l'ouverture uelle l'eau sort du corps de pompe de la cataracte, ce qui t une lenteur plus ou moins grande dans le mouvement ascen-u levier *g*.

ıs n'expliquerons pas en détail tout le mécanisme qui sert à et fermer en temps utile les diverses soupapes de la machine; ous nous contenterons de faire connaître complétement ce rapporte à la soupape d'exhaustion, ce qui suffira pour qu'on de compte de la manière dont la machine peut se suffire à ême, sans exiger, comme à l'origine, la présence d'un ouvrier lement chargé de manœuvrer les soupapes.

tige verticale s'appuie par son extrémité inférieure sur le *g* de la cataracte; on ne la voit pas sur la *fig.* 488, parce est cachée par la poutrelle GG. Cette tige monte lentement me temps que le levier *g*, et lorsqu'elle s'est élevée suffisam-une saillie qui lui est fixée latéralement vient toucher la face ure du petit levier horizontal *k*. La tige continuant à monter, ier *k* est soulevé. Une tringle *l*, supportant un contre-poids à tie inférieure, est articulée à un petit levier fixé à un axe ntal *m*, et tend constamment à faire tourner cet axe, en abais-e levier qui la supporte. Mais l'axe *m* porte une espèce de qui butte contre une autre dent fixée à la face inférieure du *k*, et qui s'oppose ainsi à ce que cet axe tourne sous l'action ntre-poids porté par la tringle *l*. Lorsque le levier *k* a été sou-ar la tige que la cataracte fait monter, la dent de l'axe *m* est e libre, et cet axe tourne en cédant à la force de traction prouve de la part de la tringle *l*. Alors le manche *n*, fixé à *n*, se relève, et une tringle *op* articulée à un petit levier que également cet axe se trouve brusquement tirée vers la droite; ier vertical *pq*, articulé en p avec la tringle op, et fixé à l'axe



pape d'admission s'ouvre par l'action d'un
lever en même temps le manche *u*. Alors l
l'action de la vapeur, et la poutrelle GG d
long taquet *x*, fixé à la poutrelle, abaisse bi
maintient ainsi la soupape d'admission ferm
la course du piston, pour que la vapeur n'ag
tente. Lorsque le piston arrive au bas de sa
la poutrelle abaisse le manche *n*, de manièr
d'exhaustion. En même temps la poutrelle G
de la cataracte; la tige verticale qui s'appuie
aussi, et les leviers *k*, *t*, peuvent s'abaiss
nouveau à l'ouverture des soupapes d'admi
jusqu'à ce que la cataracte vienne soulever c
où le manche *n* est ramené dans la position
sous l'action du taquet *y* de la poutrelle, l'axe
che un contre-poids qui ouvre la soupape d'
même temps le manche *v*. Alors le piston re
remonte avec lui, et, lorsqu'elle est sur le p
de sa course, elle soulève le manche *v*, au m
l'on ne peut pas voir sur la figure. La s
trouve ainsi fermée, et la machine s'arrête c
ce que la cataracte ouvre de nouveau les sou
d'admission.

A avec B doit être interceptée, lorsque la soupape est fermée. On voit en C une pièce fixe, formée de six cloisons qui rayonnent au-

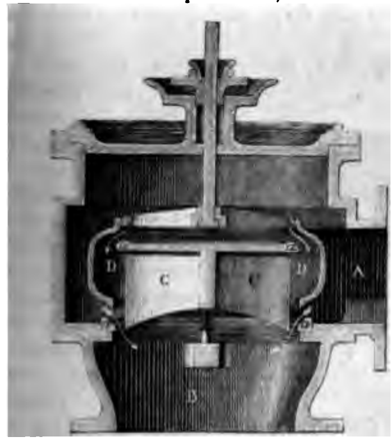


Fig. 190.

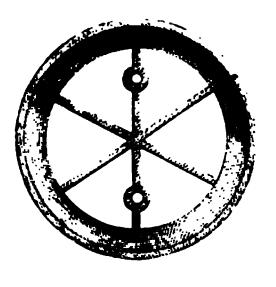


Fig. 191.

tour d'un axe central, et terminée dans le haut par un disque circulaire, qui fait corps avec ces cloisons, et qui recouvre les espèces de compartiments compris entre elles. Cette pièce fixe C, qui forme le siége de la soupape, est à jour sur tout son contour, en sorte qu'elle laisse facilement passer la vapeur de A en B. La soupape B est une sorte de fourreau qui enveloppe le siége C, et qui peut glisser le long des bords extérieurs de ses cloisons. Lorsqu'elle est abaissée autant que possible, elle s'appuie sur les parties coniques *a*, *a*, qui ne présentent que peu de largeur ; lorsque, au contraire, elle est soulevée, comme le montre la figure, elle laisse passer la vapeur par les diverses ouvertures qui sont indiquées par des flèches. On voit que, par cette disposition, la soupape n'a pas besoin d'être soulevée d'une grande quantité pour livrer un large passage à la vapeur. D'un autre côté, la soupape étant percée à sa partie supérieure d'une ouverture circulaire presque aussi grande que celle qui existe à sa partie inférieure, la différence des forces élastiques de la vapeur, en A et en B, tend beaucoup moins à l'appuyer sur son siége que si elle était simplement formée d'un disque à bords coniques, comme on l'avait supposé dans la figure théorique de la machine de Watt à simple effet (*fig.* 486, page 625).

§ 425. **Parallélogramme articulé.**—On voit sur la fig. 487

(page 630) un mode particulier de liaison de la tige B du p
l'extrémité C du balancier. Ce mode de liaison, dont l'in
due à Watt, est désignée sous le nom de *parallélogram*
Voici en quoi il consiste.

Trois pièces AB, CD, BD, *fig.* 492, sont articulées,
elles,
le bal
points
trois p
la por
balanc
tuent
lélogr
peut
forme
des a



Fig 492.

qui
chacu
sommets. Dans le mouvement d'oscillation du balancier
son axe O, l'extrémité A décrit un arc de cercle dont le
en O. Le point B décrirait également un arc de cercle a
centre, si le parallélogramme ABCD ne se déformait pa
raison de la mobilité relative des pièces qui le composen
çoit qu'on peut le déformer à mesure que le balancier
de telle manière que le point B ne sorte pas d'une m
verticale. Si l'on trouvait le moyen de rendre obligatoir
formation spéciale du parallélogramme, on pourrait att
l'extrémité de la tige verticale d'un piston: et cette tig
et descendant en même temps que le balancier oscillerait,
rait constamment la même direction, sans que son ex
portée, ni à droite, ni à gauche, par suite de sa liaison a
lancier. C'est ce à quoi Watt est parvenu d'une manièr
ment simple. Il a observé que, si l'on oblige le point B
une ligne droite verticale pendant toute une oscillation
cier, le point D de son côté décrit une ligne courbe qui
beaucoup d'être un arc de cercle; il en a conclu que, si
geait le point D à décrire l'arc de cercle qui se confon
complétement avec cette courbe, le point B ne sortirait
blement de la ligne droite qu'on lui faisait décrire préc
Or, pour obliger le point D à décrire un arc de cercl
évidemment de le relier au centre E de cet arc de cerc
sorte de petit balancier DE. Par cette disposition, le so

parallélogramme reste toujours à une même distance du point E, quelle que soit la position que prenne le balancier, le parallélogramme se déforme progressivement en conséquence de cette liaison du point D, et le point B décrit une ligne courbe qui se confond presque avec une ligne droite verticale. On peut donc attacher la tige du piston en B, et pendant tout le mouvement de va-et-vient que prendra le piston dans le cylindre, l'extrémité de sa tige ne sera écartée de la direction de l'axe du cylindre que de quantités insignifiantes de part et d'autre.

Habituellement les dimensions qu'on donne aux diverses pièces qui composent le parallélogramme articulé sont telles que le point E, centre du mouvement du point D, se trouve sur la direction de la ligne droite que doit décrire le point B; c'est ce qui fait que, sur la *fig.* 492, le point E semble être lié à la tige du piston. Mais il n'en est rien; ce point E, autour duquel le petit balancier DE oscille, est situé en avant de la tige du piston, et reste complétement fixe, tandis que cette tige monte et descend derrière lui. On voit sur la *fig.* 487 un parallélogramme où la position du point E est différente; ce point est notablement à gauche de la tige du piston.

Il existe, sur le côté CD du parallélogramme articulé, un point F qui jouit de la propriété de se mouvoir à très peu près suivant une verticale, comme le point B. Ce point est situé à la rencontre du côté CD, avec la ligne qui joindrait le point B au centre O du mouvement du balancier. On profite ordinairement de cette circonstance pour transmettre le mouvement au piston d'une pompe, dont on attache la tige au point F. L'étendue du mouvement de ce point F est évidemment plus petite que celle du point B.

§ 426. **Machine à vapeur de Watt à double effet.** — La machine à vapeur ne pouvait devenir un moteur universel, comme les roues hydrauliques, qu'autant qu'elle produirait le mouvement de rotation d'un arbre, mouvement qui peut être transmis à toute espèce de mécanisme, et qui peut, en conséquence, servir à effectuer toute espèce de travail. Mais, pour cela, il était important que l'action de la vapeur ne fût pas intermittente, comme dans la machine à simple effet; il fallait que le piston moteur fût constamment poussé par elle, quel que fût le sens dans lequel il marcherait à l'intérieur du cylindre. C'est pour arriver à ce résultat que Watt a imaginé la machine à vapeur à double effet. Cette machine, que nous allons décrire, est le type des machines à vapeur de formes diverses qui font mouvoir maintenant une quantité innombrable d'ateliers, ainsi que des appareils moteurs des bateaux à vapeur, et des locomotives dont on se sert sur les chemins de fer.

La *fig.* 493 représente l'ensemble de la machine de Watt; la *fig.* 494 en est une coupe, faite à une plus grande échelle, et des-



Fig. 493.

tinée à faire voir les parties intérieures. Le cylindre A est fermé à ses deux extrémités; c'est à son intérieur que le piston B se meut, tantôt dans un sens, tantôt dans l'autre. La tige C du piston est reliée par un parallélogramme articulé à l'extrémité D du balancier DEF; et le mouvement de va-et-vient du piston détermine un mouvement d'oscillation du balancier autour de son axe E. De l'autre extrémité F du balancier part une bielle G, qui vient saisir en H le bouton d'une manivelle fixée à l'extrémité d'un arbre horizontal K. Le mouvement d'oscillation du balancier donne lieu à un mouvement de va-et-vient de la bielle, qui, en agissant sur la manivelle, communique à l'arbre K un mouvement de rotation continu. Un volant L adapté à l'arbre K est destiné à régulariser le mouvement de cet arbre, en répartissant sur une grande masse, située à une grande distance de l'axe de l'arbre, les irrégularités d'action qui

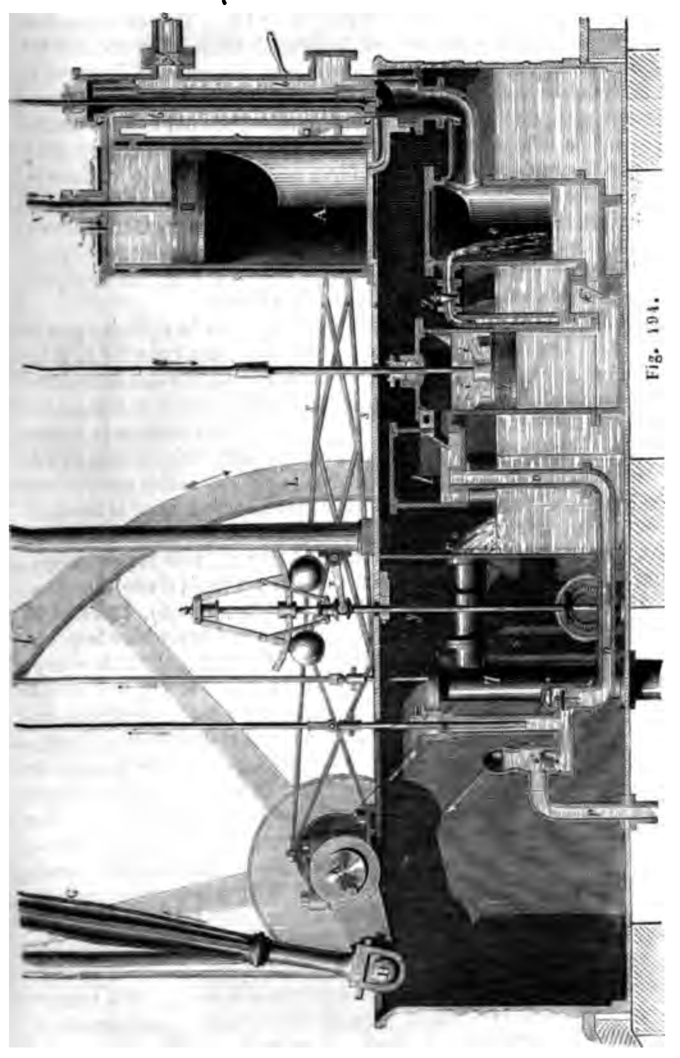


Fig. 194.

existent toujours lorsqu'un mouvement de rotation est produit au moyen d'une bielle et d'une manivelle (§ 130). Ce volant permet d'ailleurs à l'arbre de dépasser facilement ce que l'on nomme les *points morts*, c'est-à-dire les positions pour lesquelles la bielle et la manivelle ont la même direction, soit qu'elles se recouvrent mutuellement, soit qu'elles se trouvent dans le prolongement l'une de l'autre. On voit en effet que, lorsque l'arbre se trouve dans l'une ou dans l'autre de ces deux positions, la force appliquée à la bielle, dans le sens de sa longueur, ne tend à faire tourner la manivelle ni d'un côté ni de l'autre; l'arbre ne peut donc continuer à tourner qu'en vertu de sa vitesse acquise, et cette continuation de mouvement se produit d'autant plus facilement que l'arbre entraîne avec lui une plus grande masse animée d'une plus grande vitesse.

La vapeur est amenée de la chaudière dans le cylindre par le tuyau *a*, *fig.* 494. Elle pénètre d'abord dans une capacité *b*, à laquelle on donne le nom de *boîte à vapeur*, et d'où elle doit se rendre, soit dans le haut du cylindre, soit dans le bas, suivant que le piston B descend ou monte. Une pièce spéciale que l'on nomme le *tiroir*, se meut dans la boîte à vapeur, et est destinée à faire passer la vapeur qui vient de la chaudière, tantôt au-dessus, tantôt au-dessous du piston, et en même temps à faire communiquer avec le condenseur la partie du cylindre vers laquelle le piston marche. La *fig.* 495 représente le tiroir seul. C'est une sorte de tuyau creux, qui s'élargit à ses deux extrémités, et qui est muni d'une tige destinée à le faire mouvoir dans la boîte à vapeur. Les *fig.* 496 et 497 représentent les deux positions différentes que doit prendre le tiroir, suivant que le piston descend ou monte; elles ne sont que la reproduction plus en grand d'une partie de la *fig.* 494. On voit que le tiroir s'appuie par les petites faces *cc* sur les surfaces planes qui avoisinent les ouvertures aboutissant au haut et au bas du cylindre. Des garnitures d'étoupe sont d'ailleurs disposées sur le reste de son contour, vers ses deux extrémités, de manière qu'il s'adapte exactement de tous côtés avec les parois de la boîte à vapeur. Par cette disposition, on voit que la boîte à vapeur est divisée en deux parties entièrement distinctes. L'une de ces deux parties, formée de l'espace annulaire situé tout autour du tiroir, communique constamment avec le tuyau *a* qui amène la vapeur; l'autre partie, qui se compose des deux extrémités de la boîte à vapeur, réunies l'une à l'autre par l'intérieur du tiroir, communique toujours avec le tuyau *d*, *fig.* 494, qui aboutit au condenseur *e*. La *fig.* 496 montre le tiroir dans sa position la plus élevée; la vapeur qui vient de la chaudière passe autour du tiroir, et se rend dans la partie supé-

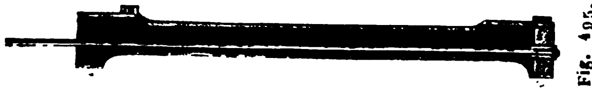


Fig. 495.

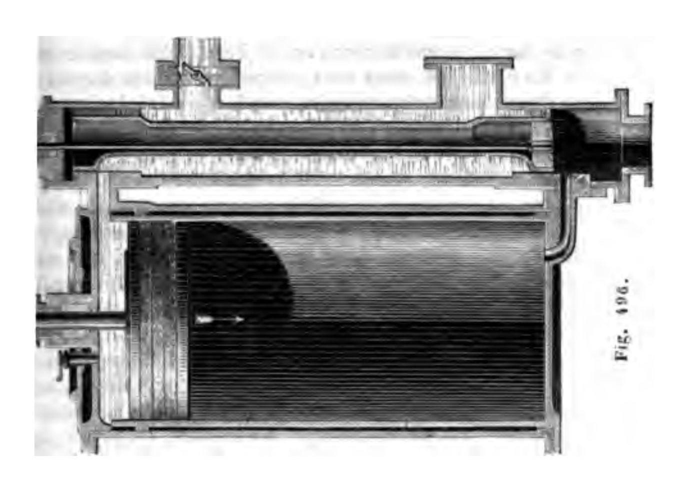


Fig. 496.

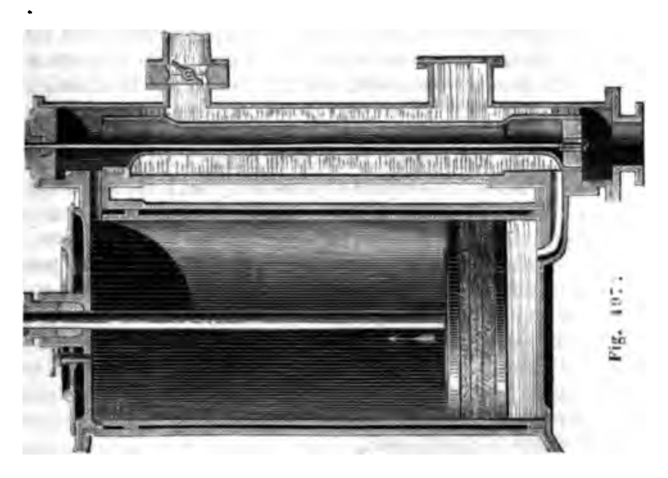


Fig. 497.



denseur *e*. Ce tuyau est muni d'un robinet *g*,
produit un étranglement plus ou moins grand, afi
tité d'eau qui s'introduit en *e*, pour y condens
chaude qui s'accumule au fond du condenseur, e
de la vapeur condensée, que de l'eau de conder
le tuyau *f*, en est constamment retirée par une
pompe, comme l'indique son nom, sert en mêr
une partie de l'air contenu dans le condense
l'avons déjà expliqué à l'occasion de la machi
(§ 422). Le piston *h* de la pompe à air est attac
tige, au point du parallélogramme articulé qui
lettre F sur la *fig*. 492 (page 638), et qui jouit
se mouvoir à très peu près suivant une ligne dr
aussi bien que le point B. Ce piston *h* est percé d
garnies de soupapes *i* qui s'ouvrent de bas en ha
fait communiquer le condenseur avec le bas de
également muni d'une soupape *k*, qui s'ouvre du

L'eau chaude, que la pompe à air extrait con
denseur, se rend dans une bâche *l*. Une portio
prise par la *pompe alimentaire*, qui la refoule d
pour remplacer celle qui en sort sous forme de
m de la pompe alimentaire est aussi mis en
balancier. Lorsqu'il s'élève, l'eau de la bâche *l*

Le mouvement alternatif que doit prendre le tiroir, pour per-
ettre à la vapeur d'agir tantôt sur la face supérieure, ntôt sur la face inférieure du piston, lui est trans- is par la machine elle-même. A cet effet l'arbre K rte une pièce P, *fig.* 498, dont le contour est cir- laire, et dont le centre est placé en dehors de xe autour duquel tourne l'arbre K. Cette pièce t désignée sous le nom d'*excentrique*. Elle est en- loppée par un anneau Q, à l'intérieur duquel elle ut glisser en tournant. Pendant le mouvement l'arbre K, la partie de l'excentrique P qui fait le us saillie sur cet arbre, est reportée tantôt vers droite, tantôt vers la gauche. L'anneau Q, lié ix tringles *ss*, ne pouvant pas tourner avec l'ex- entrique, se trouve poussé par lui, soit d'un côté, it de l'autre; et il en résulte un mouvement de a-et-vient des tringles *ss*. Ces tringles se réunis- ent à leurs extrémités opposées à l'anneau Q, et y résentent un cran à l'aide duquel elles saisissent le outon *t* d'un levier coudé *tuv*. Par suite du mou- ement de va-et-vient des tringles *ss*, le levier *uv* tourne autour de son point fixe *u*, tantôt dans n sens, tantôt dans l'autre : et son mouvement lternatif se transmet à une tige verticale, qui est rticulée d'une part, en *v*, au levier coudé, et d'une utre part à la tige du tiroir. On voit donc que la nachine, une fois mise en mouvement, s'y main- iendra d'elle-même, puisqu'au moyen de l'excen- rique P, convenablement installé, elle amène oujours le tiroir dans la position qu'il doit prendre chaque instant, pour que la vapeur continue à xercer son action. Pour mettre la machine en mou- ement, on soulève le manche qui termine les ringles *ss*, afin de rendre le levier *tuv* libre de e mouvoir sans elles ; puis, en saisissant le manche ui termine le bras *uv*, on fait mouvoir le levier de nanière à donner au tiroir successivement les posi- ions qu'il doit prendre, pour que la vapeur puisse gir alternativement sur les deux faces du piston. ussitôt que la machine marche, on rétablit la com- nunication des tringles *ss* avec le levier *tuv*, et le mouvement ontinue de lui-même.



Fig. 498.



une rainure circulaire, analogue à une gorge de p
fixé par une de ses extrémités à un axe horizo
l'autre extrémité par une fourchette dont les deu
gent dans la rainure dont nous venons de parler.
nullement le mouvement de rotation de l'anneau
tourne librement entre les branches de la fou
mouvement de rotation vient à s'accélérer, les
l'anneau monte, et la fourchette du levier z est so
chette s'abaisse, au contraire, si le mouvement
ralentit. On voit donc que le levier z fera tourn
auquel il est fixé, soit dans un sens, soit dans l'a
la machine marchera plus vite ou plus lenteme
se transmet, par une série de tringles et de levier
d'imaginer la disposition, jusqu'à l'axe d'une
installée dans le tuyau qui amène la vapeur de
la boîte à vapeur, comme on le voit sur les *fig.*
sulte de là que la soupape se dispose de manière
plus le passage de la vapeur, à mesure que l
machine devient plus rapide; tandis que, s'il dev
livre à la vapeur un passage plus large qu'à l'or

La machine à vapeur à double effet a reçu, dep
modifications ayant pour objet, soit un meilleu

ieur du cylindre, malgré les imperfections que pouvait présenter ette surface. Mais on avait besoin d'y toucher souvent, afin de remédier à l'usure des étoupes qui était très rapide. Les perfectionnements apportés au travail des métaux ont permis de supprimer complétement la garniture d'étoupes, et d'employer des pistons entièrement métalliques. On parvient en effet maintenant à raboter la surface intérieure d'un cylindre, ou, comme on dit, à *aléser* ce cylindre, de manière à faire disparaître toutes les inégalités qu'elle pouvait présenter; en sorte qu'un piston à contour bien circulaire, qui s'adapterait exactement dans le cylindre en un des points de sa longueur, s'y adapterait également bien dans tous les autres points. Il est cependant nécessaire de laisser au contour du piston une certaine flexibilité; car, sans cela, il serait bien difficile d'établir un contact exact entre lui et le cylindre, sans qu'il en résultât une trop grande adhérence, et même une sorte de grippement entre les surfaces. Aussi dispose-t-on les pistons comme on en voit ici deux exemples, *fig.* 499 à 502. Chacun des deux pistons est formé, pour

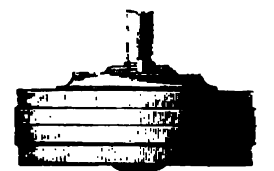


Fig. 499.

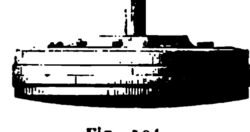


Fig. 501.



Fig. 500.

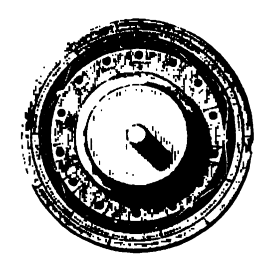


Fig. 502.

ainsi dire, de deux assises de secteurs métalliques, placés à la suite les uns des autres, de manière à constituer comme deux anneaux superposés. Ces anneaux sont compris entre deux disques circulaires d'un diamètre un peu plus petit, sans cependant être assez

serrés entre ces disques pour que les diverses pièces dont il
composent ne puissent pas glisser en s'éloignant ou en se rapproch
de l'axe du piston. Des ressorts, placés à l'intérieur, tendent c
stamment à repousser au dehors les secteurs métalliques, qui v
nent ainsi s'appliquer exactement sur la surface du cylindr
qui peuvent cependant céder, en se rapprochant de l'axe, si que
circonstance particulière les y oblige. Les ressorts du piston re
senté par les *fig*. 499 et 500 sont en assez grand nombre, et en f
d'hélices; ceux de l'autre piston, *fig*. 501 et 502, sont de sin
lames, fixées par leurs milieux, et agissant par leurs extrémité
les secteurs métalliques.

§ 428. **Excentrique triangulaire.** — Nous avons vu que,
que la vapeur pût arriver tantôt au-dessus, tantôt au-desso
piston, dans la machine à double effet, il fallait faire prend
tiroir deux positions différentes. Pour que les choses se pa
exactement comme nous l'avons supposé, il faudrait que le t
restât immobile dans chacune de ces positions, tant que le se
mouvement du piston resterait le même; et que ce tiroir passâ
pidement d'une position à l'autre, aussitôt que le piston de
changer le sens de son mouvement. L'excentrique que nous a
décrit dans la machine de Watt, et qui est destiné à faire mo
le tiroir, est loin de satisfaire à la condition qui vient d'être
quée. Le tiroir en reçoit un mouvement continu, tantôt dan
sens, tantôt dans l'autre; il ne reste immobile dans aucune de
sitions qu il prend successivement, et il ne passe pas brusque
d'une position à une autre. Aussi arrive-t-il que les ouverture
lesquelles la vapeur doit passer de la boite à vapeur dans le
ou dans le bas du cylindre ne s'ouvrent et ne se ferment que pro
sivement; et il en résulte que ces ouvertures sont étranglées
dant une partie de la course du piston, ce qui occasionne une
de travail. De même, la communication entre une des parties du
lindre et le condenseur ne s'établit que peu à peu; ce qui fait c
commencement, la vapeur qui doit se rendre au condenseur épr
une certaine difficulté à sortir du cylindre, et exerce en conséqu
une pression résistante sur la face du piston avec laquelle elle
en contact.

Pour obvier à ces divers inconvénients de l'excentrique c
laire, on l'a remplacé par des pièces analogues, auxquelles
conservé le nom d'excentrique. Nous citerons comme exemple
centrique triangulaire, *fig*. 503, qui est assez employé. Il se
pose d'une pièce A, en forme de triangle à côtés courbes, qu
fixée à un arbre tournant B; cette pièce est engagée à l'inté

l'un cadre rectangulaire que porte la tige CC, et agit alternativement sur les deux longs côtés de ce rectangle, de manière à donner un mouvement de va-et-vient à la tige CC, qui le communique au tiroir. D'après la forme de la pièce A, on voit que le tiroir passe plus rapidement d'une extrémité à l'autre de sa course que s'il était mû par un excentrique circulaire ; et que, de plus, il reste immobile pendant quelque temps, dans chacune de ses positions extrêmes.

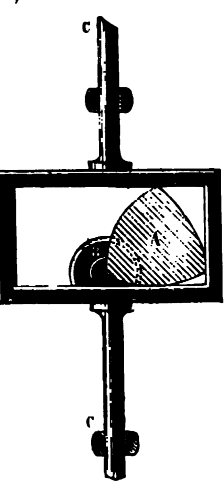


Fig. 503.

On peut faire disparaître en grande partie les inconvénients que nous avons signalés, sans abandonner l'excentrique circulaire. Il suffit pour cela de donner peu de largeur aux ouvertures que le tiroir doit faire successivement communiquer avec la boîte à vapeur et avec le condenseur, et de rendre la course du tiroir notablement plus grande que cela ne serait strictement nécessaire pour donner lieu à ces changements de communication. De cette manière, les bords du tiroir n'emploient qu'une faible portion de la durée totale de sa course à passer sur chacune des ouvertures, qui ne se trouvent par conséquent étranglées que pendant un intervalle de temps de peu d'importance. Afin que les ouvertures dont il s'agit présentent un passage suffisant à la vapeur, on compense leur peu de largeur en les allongeant dans le sens perpendiculaire au mouvement du tiroir. C'est cette possibilité d'obtenir une distribution convenable de la vapeur, au moyen de l'excentrique circulaire, jointe aux avantages qu'il présente sous le rapport de la facilité de construction et de la solidité, qui fait qu'il est encore employé dans le plus grand nombre de machines à vapeur.

§ 429. **Excentrique à détente.** — Le grand avantage que présente l'emploi de la vapeur avec détente (§ 421), sous le rapport de l'économie du combustible consommé, fait qu'on a cherché à disposer les machines à double effet de manière à y introduire ce mode d'action de la vapeur. Il suffit, pour y arriver, de donner au tiroir successivement diverses positions dans chacune desquelles il reste immobile pendant un certain temps, ainsi que nous allons le faire *comprendre sans peine*, au moyen des fig. 504 à 507. Le tiroir

A y est réduit à sa forme la plus simple, qui est généralement adoptée maintenant ; il consiste en une pièce métallique concave,

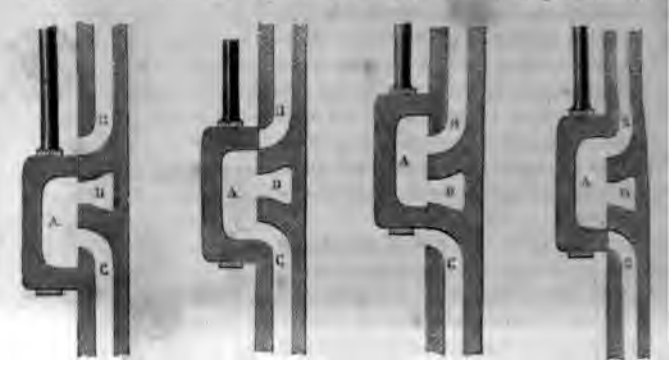


Fig. 504. Fig. 505. Fig. 506. Fig. 507.

qui s'appuie par les bords de sa concavité sur la face plane où aboutissent les trois conduits B, C, D, et qui peut glisser sur cette face, de manière à y occuper les diverses positions indiquées. Ce tiroir se meut toujours à l'intérieur de l'espace fermé, nommé *boîte à vapeur*, dans lequel arrive la vapeur fournie par la chaudière. Les conduits B et C communiquent, l'un avec la partie supérieure du cylindre, l'autre avec la partie inférieure. Le conduit intermédiaire D aboutit au condenseur.

Dans la première position du tiroir, *fig.* 504, la vapeur qui vient de la chaudière passe librement par le conduit B, et agit à pleine pression sur la face supérieure du piston. Pendant ce temps, la partie inférieure du cylindre communique avec le condenseur par le conduit C et l'intérieur du tiroir. Le piston descend en vertu de la différence des pressions qu'il éprouve sur ses deux faces. Si le tiroir remonte, pour prendre la position indiquée par la *fig.* 505, lorsque le piston n'a encore fait qu'une partie de sa course descendante, la vapeur ne peut plus passer de la boîte à vapeur dans le conduit B ; et cependant le bas du cylindre communique toujours avec le condenseur. La vapeur qui se trouve dans le haut du cylindre agit donc en se détendant, et c'est sous cette action que le piston achève sa course descendante.

Si le tiroir remonte encore, pour prendre la position indiquée par la *fig.* 506, au moment où le piston a atteint le bas du cylindre, la

ıpeur de la chaudière passe par le conduit C, et vient exercer sa ression sur la face inférieure du piston ; pendant ce temps, celle qui était introduite au-dessus de lui se rend dans le condenseur, par le ›nduit B et l'intérieur du tiroir. Si enfin le tiroir s'abaisse d'une ›rtaine quantité, pour prendre la position indiquée par la *fig*. 507, rsque le piston n'a parcouru en montant qu'une partie de la hauteur ı cylindre, la communication de la chaudière avec le bas du cylindre ı trouve interceptée, sans que cependant le haut du cylindre cesse ꝫ communiquer avec le condenseur ; la vapeur qui s'est introduite ısque-là sous le piston continue donc à agir en se détendant, et le ›usse ainsi jusqu'au haut du cylindre. Le roir revenant alors dans la position de la *j*. 504, le piston recommencera à descenre, et ainsi de suite.



Fig. 508.

Pour faire prendre au tiroir successiveıent les quatre positions dont nous venons ꝫ parler, on se sert d'un excentrique d'une ·rme particulière que l'on nomme *excen-ique à détente*. Il se compose essentielleent d'une pièce A, *fig*. 508, fixée à un ·bre B, auquel la machine donne un mouꝫment de rotation. Le contour de cette .èce A est formé de quatre arcs de cercles , *n*, *p*, *q*, concentriques à l'arbre B, et ꝫliés l'un à l'autre par des parties cour-ꝫs. Deux galets C, C, portés par une tige , qui peut glisser dans le sens de sa lonueur, sont toujours en contact avec les eux bords opposés de l'excentrique A. orsque l'arbre B tourne, de manière que excentrique touche le galet supérieur, ıccessivement par les arcs *n*, *q*, *m*, *p*, la ge D prend quatre positions différentes. ·r, il est aisé de voir que ces positions corꝫspondent précisément à celles que nous vons indiquées pour le tiroir ; en sorte u'il suffit de faire conduire le tiroir par la ge D, pour que la vapeur agisse avec déꝫnte. La fraction de la course du piston, endant laquelle la vapeur agit à pleine pression, dépend évidemment de la grandeur qu'on a donnée aux arcs *m*, *n*, qui *ont destinés à maintenir* le tiroir dans ses deux positions extrêmes

§ 430. **Détente Clapeyron.** — On a imaginé bien des dispositions différentes, pour faire agir la vapeur avec détente dans les machines à double effet. Nous n'entrerons pas dans le détail de ces dispositions, qui sont plus ou moins compliquées ; mais nous nous contenterons de faire connaître le moyen trouvé pour cela par M. Clapeyron, en employant un tiroir ordinaire mû par un excentrique circulaire. Ce moyen se recommande par sa grande simplicité, et convient surtout pour les machines où les mouvements sont très rapides, comme les locomotives dont nous parlerons bientôt. Le tiroir A, *fig.* 509, se meut comme à l'ordinaire sur une surface plane où aboutissent les tuyaux B, C, communiquant avec les deux extrémités du cylindre, ainsi que le tuyau D par lequel la vapeur se rend au condenseur. Mais les bords du tiroir sont munis de deux pièces M, M, dont la largeur est beaucoup plus grande que celle des ouvertures B, C. Il résulte de cette seule modification apportée au tiroir, que lorsqu'une des ouvertures B, C, cesse d'être en communication avec la boîte à vapeur, elle reste fermée pendant quelque temps, avant de communiquer avec le conduit D, par l'intérieur du tiroir. On conçoit donc que, si l'on dispose l'excentrique de manière que chacune de ces ouvertures B, C, soit fermée à un moment convenable par les bords élargis M, M, du tiroir, il pourra arriver que la vapeur agisse d'abord à pleine pression, pendant une portion de la course du piston, et ensuite avec détente, pendant le reste de cette course.



Fig. 509.

§ 431. **Machine de Woolf, à deux cylindres.** — Quelquefois on dispose, à côté l'un de l'autre, deux cylindres de même hauteur et de diamètres différents, dans lesquels la vapeur se rend successivement. Cette disposition, imaginée par Woolf, a encore pour objet de faire agir la vapeur avec détente. Les deux pistons A, B, *fig.* 510, sont liés l'un à l'autre par les extrémités supérieures de leurs tiges ; en sorte qu'ils doivent se mouvoir ensemble, et être toujours à la même hauteur dans les cylindres C, D. Les robinets E, F, permettent à la vapeur de la chaudière de pénétrer dans le cylindre C, soit au-dessus, soit au-dessous du piston A ; les robinets G, H, sont adaptés à des tuyaux à l'aide desquels on peut faire communiquer, soit le haut du cylindre C avec le bas du cylindre D, soit le bas du cylindre C avec le haut du cylindre D ; enfin la vapeur

peut sortir du second cylindre, pour se rendre au condenseur, par les robinets K, L. Les robinets E, H, L, étant ouverts, et les autres

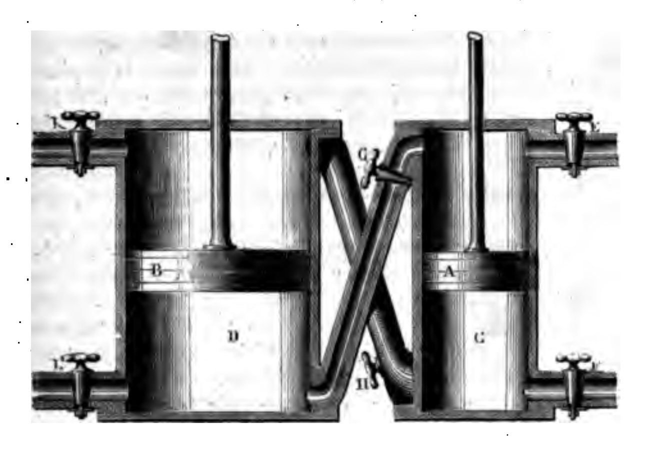


Fig. 510.

fermés, la vapeur de la chaudière presse le piston A de haut en bas. La vapeur qui s'était introduite précédemment sous ce piston, et qui a déjà passé en partie dans le haut du cylindre D, presse le piston A de bas en haut, et le piston B de haut en bas : mais cette seconde pression l'emporte sur la première, parce que le piston B est plus large que l'autre : la différence de ces deux pressions s'ajoute à la pression que le piston A éprouve sur sa face supérieure, pour former la force totale qui tend à abaisser l'ensemble des deux pistons. Les pistons descendent sous l'action de cette force totale. Lorsqu'ils sont au bas de leur course, les robinets E, H, L, se ferment : les autres s'ouvrent : la vapeur de la chaudière se rend dans le bas du cylindre C ; celle qui était au haut de ce cylindre, passe au bas du cylindre D ; et celle qui s'était rendue dans le haut du cylindre D s'échappe dans le condenseur. Les pistons remontent alors sous l'action d'une force égale à celle qui les avait fait descendre ; et ainsi de suite. Les divers robinets n'ont été mis ici que pour la facilité de l'explication ; en réalité on emploie des tiroirs, qui remplissent le même objet.

La force totale qui fait descendre ou monter l'ensemble des deux pistons est *plus grande* qu'elle ne le serait, si le cylindre C existait

seul, et si la vapeur, après avoir agi dans ce cylindre, passait immédiatement dans le condenseur; et cependant la quantité de vapeur dépensée pour chaque coup de piston serait la même. On voit donc que l'emploi d'un second cylindre occasionne un avantage marqué; la même quantité de vapeur donne lieu à la production d'une plus grande quantité de travail. Cela tient à ce que la vapeur se détend en passant du cylindre C dans le cylindre D, et qu'elle ne se rend au condenseur qu'après qu'on a ainsi utilisé sa détente.

§ 432. **Détente variable.**—Nous avons indiqué le moyen employé par Watt, pour faire varier l'action de la vapeur dans le cylindre, suivant que le mouvement de la machine s'accélère ou se ralentit, de manière à entretenir la vitesse de sa marche dans des limites convenables. Ce moyen, qui consiste dans l'emploi d'une soupape à gorge destinée à rétrécir plus ou moins le passage de la vapeur (§ 426), a l'inconvénient d'entraîner une perte de travail, par la manière même dont il agit (§ 321). Aussi a-t-on cherché à lui en substituer un autre plus avantageux. C'est ce à quoi on est parvenu, en disposant l'appareil qui sert à la distribution de la vapeur de manière que la détente puisse se produire à volonté à un degré plus ou moins grand; c'est-à-dire que la vapeur puisse agir à pleine pression pendant une fraction plus ou moins grande de la course du piston, pour se détendre ensuite. On voit, en effet, que si, à chaque coup de piston, on laisse subsister pendant moins longtemps la communication de la chaudière avec le cylindre, on dépensera moins de vapeur, et le travail développé par l'action de la vapeur sur le piston sera diminué; si, au contraire, on laisse agir la vapeur à pleine pression pendant une plus grande fraction de la course du piston, on dépensera plus de vapeur, et le travail appliqué à la machine sera plus grand. On comprend donc qu'on puisse, en faisant varier la détente, mettre constamment le travail moteur développé par l'action de la vapeur dans le cylindre en rapport avec la grandeur du travail résistant qui est appliqué à la machine, de manière à maintenir sa vitesse dans des limites convenables.

Nous n'entrerons pas dans la description des pièces qui permettent de faire varier la détente à volonté. Nous nous contenterons de dire que la variation de la détente est tantôt laissée à la volonté du mécanicien qui gouverne la machine, et tantôt produite par le régulateur à force centrifuge. Dans ce second cas, la machine se règle elle-même, et la détente varie suivant les besoins de la machine, sans que le mécanicien ait à s'en inquiéter.

§ 433. **Suppression du condenseur.**—L'emploi d'un conden-

[redacted]

'est indispensable qu'autant que l'on ne donne pas à la vapeur, la chaudière, une force élastique de plus d'une atmosphère. il n'en est plus de même lorsque la vapeur agit avec une élastique notablement supérieure à celle de l'air atmosphé-. Il suffit, en effet, dans ce cas, de mettre alternativement une des extrémités du cylindre en communication avec l'at-hère, pendant que l'autre extrémité communique avec la dière, pour que le piston soit mis en mouvement par la diffé-e des pressions qu'il supporte sur ses deux faces. Ainsi l'emploi condenseur est facultatif, pour les machines à haute pression. e supprime, ou on le conserve, suivant les conditions dans les-les on est placé. Si l'on a facilement à sa disposition une grande ntité d'eau pouvant servir à la condensation de la vapeur, on e cette condensation, parce qu'il en résulte un avantage sous le ort du travail produit par une quantité donnée de vapeur: le qui se forme dans la partie du cylindre vers laquelle le piston che occasionne une augmentation de travail moteur, qui n'est compensée par le travail résistant dû à la pompe à air et à la pe à eau froide. Si, au contraire, on ne peut se procurer que ilement l'eau nécessaire à la condensation, ou bien si l'objet que remplir la machine exige qu'elle n'occupe que peu de place, pprime le condenseur, et par suite la pompe à air, et la pompe ı froide.

434. **Avantage des machines à haute pression.** — Cher-ıs à nous rendre compte de l'avantage que peut présenter l'emploi ı vapeur à haute pression; et pour cela supposons d'abord qu'on ı fasse pas agir avec détente. Si l'on donne à la vapeur une) élastique de 4 atmosphères, sa température sera de 144°, rès le tableau de la page 612: elle serait de 100°, si la force ique était seulement de 1 atmosphère. En admettant qu'on se appliquer ici les lois de Mariotte et de Gay-Lussac (§§ 249 et), on verra qu'un volume 1 de vapeur saturée à la température 44° occupera un volume 4, si on le dilate, sans que sa tempéra-change, jusqu'à ce que sa force élastique devienne égale à une sphère; et que son volume se réduira ensuite à 3,58, si l'on se sa température à 100°, sans que sa force élastique cesse e d'une atmosphère. On peut donc dire que, si deux masses s d'eau sont réduites en vapeur à saturation, l'une sous la sion de 4 atmosphères, l'autre sous la pression de 1 atmos-, elles occuperont des volumes qui seront entre eux dans le ort des nombres 1 et 3,58. Les cylindres de deux machines à ır, qui devront dépenser la même masse de vapeur pour chaque

coup de piston, en fonctionnant, l'une à 4 atmosphères, l'autre à 1 atmosphère, devront donc avoir des capacités proportionnelles à ces mêmes nombres 1 et 3,58 ; c'est-à-dire que, si les pistons parcourent le même chemin dans les deux machines, leurs surfaces devront être entre elles dans le même rapport que ces nombres. Mais la pression supportée par chaque centimètre carré de la surface du premier piston est quatre fois plus grande que celle que supporte chaque centimètre carré de la surface du second; donc, en définitive, les pressions totales exercées par la vapeur sur les deux pistons seront entre elles comme les nombres 4 et 3,58. Les quantités de travail développées par la même masse d'eau réduite en vapeur, dans les deux machines, seront donc aussi entre elles comme ces nombres; c'est-à-dire qu'il y a un peu plus de travail produit par la vapeur qui agit à 4 atmosphères que par celle qui agit à une atmosphère. Mais aussi on voit, par le tableau de la page 613, qu'il faut plus de chaleur pour réduire une masse d'eau en vapeur saturée sous la pression de 4 atmosphères que sous la pression d'une seule atmosphère ; en sorte que, sous le point de vue économique, il serait à peu près indifférent de faire agir la vapeur à haute ou à basse pression.

D'après cela, les machines à haute pression, dans lesquelles la vapeur n'agit pas avec détente, ne présentent d'avantage réel qu'en ce que la pression résistante, provenant de la vapeur qui s'échappe du cylindre pour se rendre, soit au condenseur, soit dans l'atmosphère, est d'autant plus faible que la surface du piston est plus petite ; et aussi en ce que le cylindre occupe moins de place qu'il ne devrait en occuper, si la vapeur était employée à basse pression.

Mais, dans le cas où l'on utilise la détente de la vapeur, et c'est ce qu'on cherche toujours à faire maintenant, les machines à haute pression présentent un avantage très marqué, qui consiste en ce que la détente peut être produite dans une étendue beaucoup plus grande que dans les machines à basse pression.

Dans la plupart des machines à vapeur que l'on construit actuellement, la vapeur est employée avec une force élastique de 4, 5, et même 6 atmosphères; on dépasse rarement cette limite.

§ 435. **Transmission du mouvement du piston à un arbre tournant.** — Dans la machine de Watt, le mouvement de va-et-vient du piston se transmet à un arbre tournant, par l'intermédiaire d'un balancier, d'une bielle et d'une manivelle. Souvent on supprime le balancier, et l'on réunit directement l'extrémité de la tige du piston à la bielle, *fig.* 514. Dans ce cas la tige A a besoin d'être guidée

ıs son mouvement, pour qu'elle ne soit pas faussée par la résis-
ce oblique qu'elle éprouve de la part de la bielle, tantôt dans un

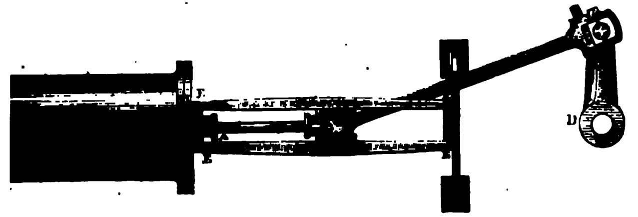


Fig. 511.

s, tantôt dans l'autre, suivant que la
nivelle CD est placée d'un côté ou de
ıtre de l'arbre. A cet effet, l'extrémité
e la tige est munie de pièces spéciales,
nmées *glissières*, placées de chaque côté
cette extrémité, et assujetties à glisser
re des guides fixes E, E; ou bien encore
remplace ces glissières par des galets qui
vent rouler sur les guides entre lesquels
sont compris.

M. Cavé a encore simplifié la transmis-
n du mouvement du piston à l'arbre tour-
nt, en supprimant la bielle, et articulant
ectement la tige du piston à la manivelle.
ıis, pour cela, il a fallu rendre le cylin-
e A mobile, *fig*. 512, afin que la tige B
piston pût être toujours dirigée suivant
n axe, dans toutes les positions qu'elle
end, d'après sa liaison avec la manivelle
). Aussi le cylindre A est-il supporté par
ux tourillons E, autour desquels il tourne
oscillant, tantôt d'un côté, tantôt de l'au-
e : c'est ce qui a fait donner aux machines
ce genre le nom de ***machines à cylindre
cillant***. Pour que le piston puisse tou-
urs donner au cylindre la position convenable, on munit sa tige de
ux galets F, F, qui s'appuient sur deux tringles fixées sur le
nd du cylindre. Les tourillons E étant les seules parties du cylindre



Fig. 512.

qui conservent la même position pendant le mouvement de la machine, c'est par l'intérieur de l'un d'eux que passe la vapeur qui vient de la chaudière, et par l'intérieur de l'autre que sort celle qui a cessé d'agir. L'appareil qui sert à la distribution de la vapeur est porté par le cylindre, et oscille avec lui.

§ 436. **Chaudières à vapeur.** — La production de la vapeur nécessaire à la marche des machines à vapeur s'effectue dans des chaudières auxquelles on donne des formes diverses. On voit, par ce que nous avons dit relativement à l'invention des machines à vapeur (§§ 414 à 418), que les premières chaudières employées étaient sphériques, ou au moins formées d'une portion de sphère avec un fond plat. Cette forme, qui a dû naturellement se présenter tout d'abord, a le grave défaut de n'offrir qu'une faible surface pour une masse d'eau considérable, ce qui est peu favorable à la production de la vapeur. Aussi Watt a-t-il donné une disposition toute différente à ses chaudières. Il a adopté pour cela la forme d'un cylindre allongé dans le sens horizontal, et ayant pour section perpendiculaire à ses arêtes une courbe à parties rentrantes. Les chaudières de Watt pouvaient ainsi recevoir l'action directe de la flamme du foyer sur une surface beaucoup plus grande que les chaudières précédentes, à égalité de capacité intérieure.

La forme d'un cylindre allongé est celle qu'on adopte encore maintenant dans la construction des chaudières à vapeur. Mais on a dû modifier la section transversale du cylindre, en raison de la grandeur de la force élastique avec laquelle on fait ordinairement agir la vapeur. On conçoit, en effet, que si la chaudière présente des parties rentrantes, et que la pression exercée par la vapeur à son intérieur soit notablement supérieure à la pression atmosphérique, cet excès de pression tend à déformer la chaudière, en repoussant au dehors les parties rentrantes; les faces planes elles-mêmes, s'il y en a, doivent être rendues convexes par l'effet de cet excès de pression. Aussi, pour que les chaudières ne se déforment pas, et qu'elles résistent également bien partout à la pression intérieure, on leur donne la forme d'un cylindre allongé à base circulaire, et on les termine à leurs extrémités par des calottes sphériques, souvent même par des hémisphères. C'est ce que l'on voit sur les *fig.* 513 et 514, dont la première est une coupe longitudinale du fourneau, destinée à faire voir la chaudière dans le sens de sa longueur, et la seconde en est une coupe transversale. Au-dessous du corps A de la chaudière, on voit deux cylindres B, B, qui ont à *peu près* la même longueur qu'elle, et dont le diamètre est plus *petit*. Ces cylindres, auxquels on donne le nom de bouilleurs, com-

[redacted]

iquent avec la chaudière A au moyen des tubulures C, C, et destinés à augmenter la surface de chauffe.

e fourneau est construit de manière à obliger la flamme à venir her successivement les diverses parties de la surface de la idière. A cet effet, une cloison horizontale D règne dans toute

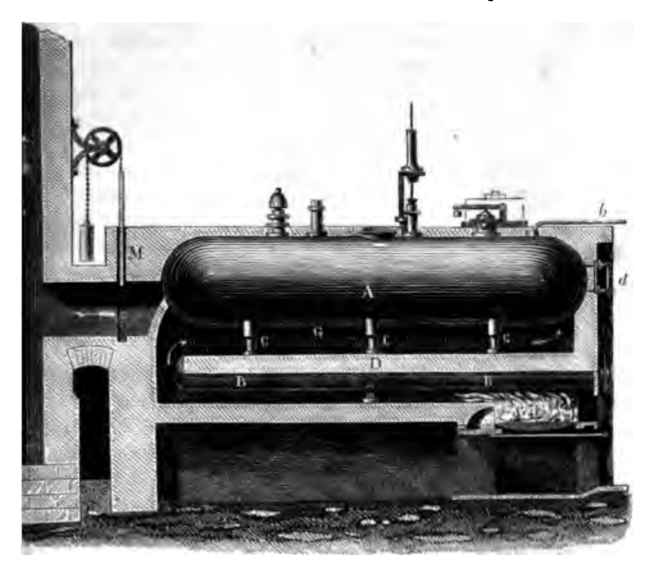


Fig. 513.

ongueur, à la hauteur des bouilleurs; et deux cloisons ver- les, passant par les tubulures C, C, divisent en trois comparti- its l'espace qui reste libre entre cette cloison horizontale et la ie inférieure du corps de la chaudière. La flamme, en sortant oyer E, se rend d'abord dans le conduit F, qui la mène à l'ex- nité postérieure de la chaudière; de là elle passe dans le com- iment G, et revient vers la partie antérieure; enfin, arrivée à trémité du conduit G, elle se divise en deux, et retourne à la ie postérieure de la chaudière en passant par les conduits laté- s H, H, auxquels on donne le nom de *carneaux*. A sa sortie des ieaux H, H, elle se rend dans la cheminée L. Un registre M, dont oids est équilibré par un contre-poids, sert à fermer plus ou

moins le conduit qui relie les carneaux à la cheminée, afin
le tirage.

Les chaudières à bouilleurs, construites en tôle, sont
que l'on emploie le plus en France, mais elles sont loin
seules employées. Ainsi on trouve souvent des chaudi
bouilleurs; ou bien des chaudières avec un tuyau cylind
les traverse dans toute leur longueur, et au milieu d
installé le foyer; ou bien encore des chaudières traversée
sieurs petits tuyaux parallèles, dans lesquels passe la fla
Dans tous les cas, quel que soit le système de la chaudi
emploie, il faut faire en sorte q
face de chauffe ait une étendu
tionnée à la quantité de vapeur
être produite dans un temps d
L'expérience a fait voir que c
face doit être d'au moins 1 m
par force de cheval de la machin
même il serait convenable de la
$1^{mq},3$.

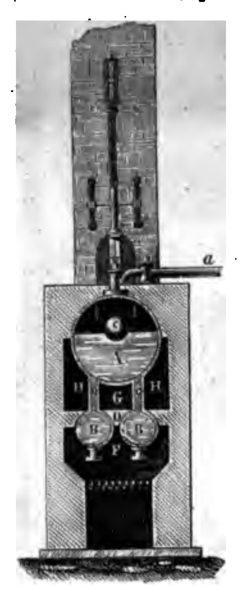


Fig. 511.

Un tuyau, que l'on voit en *a*,
part de la paroi supérieure de
dière, et sert à conduire la va
machine. Un second tuyau *b*,
sert à l'alimentation de la chaudi
à-dire à l'introduction de l'eau d
remplacer celle qui s'en va sous
vapeur; ce tuyau plonge dans
dière, et vient déboucher au r
l'eau qu'elle contient.

§ 437. Depuis que la vapeur
ployée comme moteur, on a eu à
un grand nombre de malheurs,
de l'explosion des chaudières à
Aussi s'est-on préoccupé de tr
moyens convenables pour préve
tour de semblables malheurs. Avant de faire connaître ce
moyens auxquels on s'est arrêté, nous indiquerons d'abord
cipales causes des explosions des chaudières.

Une première cause d'explosion, celle que l'on avait
tout d'abord comme en étant la cause unique, consist
défaut de solidité de la chaudière. Si l'on augmente pro
ment la tension de la vapeur à l'intérieur d'une chaudièr

it qu'il arrivera un moment où les parois ne seront plus capables à résister à sa force expansive, et elles se déchireront pour lui rer passage au dehors. Supposons donc qu'une chaudière soit sez peu solide pour que cette limite de résistance, qu'elle ne peut is dépasser, corresponde à une tension que la vapeur puisse prendre ndant la marche de la machine; il en résultera nécessairement ne explosion.

Mais il est très rare que les choses se passent ainsi. Le plus habiellement les explosions sont dues à ce que certaines parties des rois de la chaudière se trouvent portées accidentellement à une mpérature très élevée, et sont mises ensuite rapidement en con.ct avec une certaine quantité d'eau. On conçoit, en effet, que ces rconstances peuvent occasionner une explosion, par deux causes fférentes. En premier lieu, l'eau qui vient à toucher des parois ugies par l'action du feu, doit se vaporiser rapidement, ce qui dérmine une augmentation brusque de la pression à l'intérieur de chaudière. En second lieu, le refroidissement presque instantané, i'éprouvent ces parois rougies de la chaudière, amène une modiration dans leur constitution moléculaire, et facilite beaucoup leur échirure sous l'action de la pression intérieure.

Tant que la portion des parois d'une chaudière qui est en contact rec la flamme au dehors reste baignée par l'eau au dedans, il 'y a pas à craindre que les effets dont nous venons de parler se roduisent. Mais il n'en sera plus de même si le niveau de l'eau aisse à l'intérieur, au-dessous des points les plus élevés des careaux dans lesquels la flamme circule. On voit que, dans ce cas, s parties de la paroi de la chaudière qui sont situées entre le iveau de l'eau et le haut des carneaux peuvent être facilement ougies: et si l'eau se trouve projetée sur ces parois rouges, par suite i bouillonnement qui accompagne l'ébullition, il pourra en résulter ne explosion.

L'eau employée à l'alimentation d'une chaudière y dépose souent des matières solides, qui forment un encroûtement de plus en lus épais. Les parois inférieures de la chaudière, n'étant plus en ontact direct avec l'eau, peuvent prendre une température beauoup plus élevée que si ce dépôt n'existait pas. Si ensuite, par une ause quelconque, il vient à se produire quelque fissure dans cet ncroûtement, l'eau s'y infiltre, se transforme en vapeur au contact e parties plus chaudes, et, soulevant ainsi le dépôt, met à nu une tendue plus ou moins grande de la paroi qu'il recouvrait. Souvent es explosions se sont produites dans ces circonstances.

Les explosions des chaudières à vapour sont habituellement

accompagnées d'effets mécaniques extraordinaires, tels que la projection de pièces d'un grand poids à une distance énorme. On aurait peine à se rendre compte de ces effets, si l'on cherchait à les expliquer par l'action de la vapeur qui existait dans la chaudière au moment de l'explosion, lors même qu'on attribuerait à cette vapeur une tension considérable. Mais il faut observer que la masse d'eau contenue dans la chaudière, étant brusquement mise en communication avec l'atmosphère, et ayant une température très notablement supérieure à 100°, doit se vaporiser en grande partie, et donner lieu presque instantanément à la production d'une quantité de vapeur extrêmement grande. C'est cette vapeur, formée au moment même de l'explosion, qui occasionne les effets extraordinaires que l'on observe.

§ 438. Voyons maintenant quelles sont les mesures que l'on a adoptées pour s'opposer à ce que les circonstances que nous venons de signaler puissent se présenter.

Pour qu'une chaudière à vapeur puisse être employée en France, il faut qu'elle porte un timbre qui indique le nombre d'atmosphères que la tension de la vapeur à son intérieur ne doit pas dépasser. Ce timbre est poinçonné par l'administration, après qu'on a fait subir à la chaudière une épreuve, qui consiste à la remplir d'eau, et à exercer sur cette eau, au moyen d'une pompe foulante, une pression triple de celle que le timbre indique.

Pour que la tension de la vapeur, dans la chaudière, ne puisse pas dépasser la limite pour laquelle la chaudière a été éprouvée, on lui adapte deux soupapes de sûreté, une à chacune de ses extrémités. La *fig.* 515 en montre la disposition. La soupape A est placée

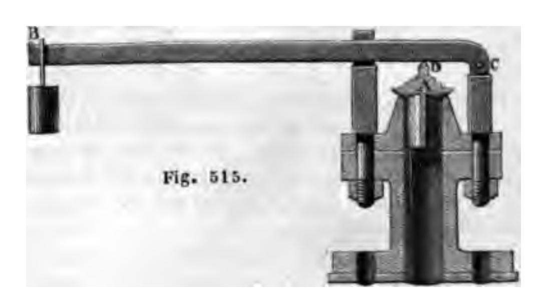


Fig. 515.

à l'extrémité d'un tuyau vertical qui communique inférieurement avec la chaudière. Un levier BC, mobile autour du point C, s'ap-

tête de la soupape. Un poids est suspendu à l'extré-
vier; il y a été choisi de manière à exercer sur la
pression égale à celle qu'elle éprouverait de bas en
le la vapeur, si sa force élastique atteignait la valeur
pas dépasser. La *fig.* 516 montre la soupape seule,
n est une coupe horizontale, destinée
ndre la disposition de la partie qui
tuyau qu'elle doit fermer. Cette partie
soupape est formée de trois ailettes,
uider dans son mouvement, lorsqu'elle
r un excès de tension intérieure, et
ées de manière à s'opposer aussi peu
a sortie de la vapeur.



Fig. 516.

important que le chauffeur puisse con-
instant la force élastique de la va-
active le feu plus ou moins, de ma-
ir cette force élastique dans des limites
cet effet on adapte à la chaudière un
ii communique constamment avec son
se sert souvent pour cela d'un mano-
mprimé, *fig.* 518, dont nous avons
ncipe précédemment (§ 261). La va-
a, et vient exercer sa pression sur le
u dans un vase *b*, où plonge un tube
ntenant de l'air, et fermé par le haut.
érieure de la colonne de mercure, dans
e, indique la force élastique de la va-
hères, d'après la position qu'elle occupe
on qui accompagne ce tube.



Fig. 517.

ois que la tension de la vapeur ne doit
atmosphères, le manomètre à air com-
e remplacé par un manomètre à air
e manomètre, dont les indications sont
que celles du précédent, présente un
sez grave; la grande longueur de tube
de la colonne de mercure doit par-
que la pression est de 2, 3, 4 atmos-
que cette extrémité est souvent mal
l'on puisse la voir facilement. Pour
convénient, on adopte quelquefois la
a *fig.* 519. La vapeur, qui arrive en *a*, exerce sa
mercure du vase *b*, et le fait monter dans le tube



Fig. 518.

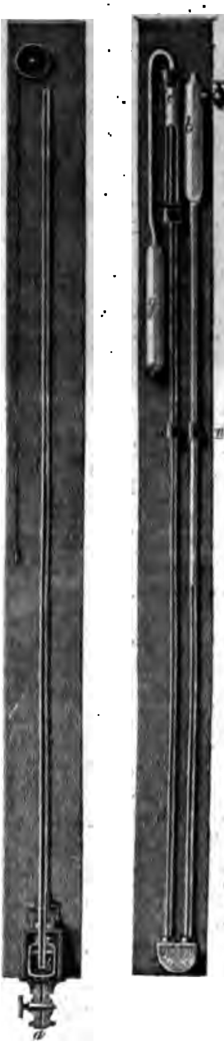


Fig. 519. Fig. 520.

cc, qui est ouvert par le haut; un flotteur *d* s'appuie constamment sur le sommet de la colonne de mercure, et est suspendu à un fil, qui passe sur une poulie, et qui supporte un contre-poids *e* à son autre extrémité. Les mouvements de la colonne de mercure sont indiqués par ce contre-poids, qui se meut en sens contraire, et que l'on aperçoit très facilement.

La *fig.* 520 montre une autre disposition du manomètre à air libre, dans laquelle l'extrémité supérieure de la colonne de mercure se meut dans une étendue beaucoup moins grande. La vapeur de la chaudière arrive en *a*, et communique librement avec l'intérieur d'une capacité *b*. Du bas de cette capacité part un tube métallique *cc*, qui descend d'abord, se recourbe ensuite pour remonter suivant *dd*, et vient aboutir à un tube de verre *e* qui est beaucoup plus large. Du haut de ce tube de verre part un tube *f* qui vient pénétrer dans un vase *g*, sans toucher les bords de l'ouverture par laquelle il entre à son intérieur. Le mercure se trouve dans le tube recourbé *cd*, il descend en *c* sous l'action de la vapeur, et monte en même temps en *d*, jusque dans le tube de verre *e*, où il éprouve la pression de l'air atmosphérique, qui pénètre librement par le tube *f*. C'est la différence de niveau du liquide dans ces deux branches qui sert de mesure à l'excès de la pression de la vapeur sur celle de l'atmosphère. Or, à cause de la différence de diamètre des tubes *c*, *e*, une grande dépression dans le premier n'entraîne qu'une faible élévation dans le second; il en résulte que le chemin parcouru par la surface du mercure en *e* est très petit, lors même

que la pression de la vapeur varie beaucoup. Le vase *g*, dans lequel débouche le tube *f*, est destiné à recueillir le mercure, dans le cas où un excès de pression dans la chaudière le ferait sortir du tube recourbé *cd*.

Tout récemment, M. Bourdon a imaginé un manomètre métallique, qui remplace avec avantage les manomètres à mercure. La pièce principale de ce manomètre consiste en un tuyau courbe de cuivre B, *fig*. 521, à l'intérieur duquel on fait agir la pression de la vapeur. L'une des extrémités de ce tuyau est fixée au point où aboutit le tuyau A, par lequel arrive la vapeur qui vient de la chaudière; et d'ailleurs il n'est attaché à la boîte qui le contient par aucun autre point. Son extrémité C est fermée. Sa section transversale n'est pas un cercle, mais une courbe très aplatie, comme le montre la *fig*. 522, qui en donne les dimensions en vraie grandeur. Lorsque la vapeur de la chaudière communique avec l'intérieur du tuyau B, la pression qu'elle exerce contre ses parois le gonfle un peu en diminuant l'aplatissement de sa section transversale; ce léger gonflement entraine un changement dans la courbure du tuyau, qui tend à se redresser de plus en plus, à mesure que la pression intérieure augmente. Il en résulte que l'extrémité C se déplace, et fait mouvoir une aiguille DEF, à laquelle elle est liée par la tige CD. Cette aiguille, mobile autour du point E, aboutit par son extrémité F à divers points d'un arc divisé, dont la graduation a été faite de manière a indiquer la pression en atmosphères, d'après la position de l'aiguille. Le manomètre métallique de M. Bourdon est beaucoup plus commode que les précédents, dont les tubes de verre se brisent facilement, et occasionnent la perte du mercure; mais on a besoin de s'assurer de temps en temps si les indications qu'il fournit ne cessent pas d'être exactes, par suite des modifications lentes qui pourraient survenir dans l'état moléculaire



Fig. 521.



Fig. 522.

du tuyau courbe, sous l'action prolongée de la pression qui s'exerce à son intérieur.

§ 440. D'après ce que nous avons dit sur les causes d'explosions des chaudières (§ 437), on doit surtout éviter que certaines parties des parois se trouvent en contact avec la flamme au dehors, sans être mouillées par l'eau en dedans, soit en raison des encroûtements qui résultent des matières solides déposées par l'eau, soit par suite d'un trop grand abaissement du niveau de l'eau dans la chaudière.

On se met à l'abri de la première de ces deux causes d'accidents, en nettoyant souvent l'intérieur de la chaudière. On emploie aussi quelquefois un moyen particulier, qui consiste à introduire dans la chaudière des substances diverses, suivant la nature du dépôt formé par les eaux, afin que ce dépôt ne se durcisse pas, [illegible] à l'état pulvérulent.

Quant à la position du niveau de l'eau dans la [illegible] doit être l'objet d'une surveillance continuelle de la part du [illegible] feur : et c'est pour cela qu'on met à sa disposition des [illegible] destinés à la lui indiquer à chaque instant. Parmi ces [illegible] nous citerons d'abord le flotteur *c*, *fig*. 514 (page 660) qui [illegible] et descend en même temps que le niveau de l'eau, et dont le mouvement est rendu sensible au dehors, par une tige déliée qui le surmonte verticalement et qui traverse la paroi de la chaudière. On emploie aussi deux robinets, qui sont adaptés à la chaudière en des points peu éloignés de la position que doit avoir constamment le niveau de l'eau, et situés l'un au-dessus, l'autre au-dessous de ce niveau ; en ouvrant successivement ces deux robinets, on doit voir sortir de l'eau par le plus bas des deux, et de la vapeur par l'autre. Un troisième moyen, qui est excellent pour constater la position du niveau de l'eau dans la chaudière, consiste à adapter à sa partie antérieure un tube de verre *d*, *fig*. 513 (page 659), qui communique par ses deux extrémités avec l'intérieur, et qui est placé de manière que le niveau de l'eau doive toujours correspondre à peu près au milieu de sa longueur ; l'eau se rend librement dans ce tube par le bas, et y prend le même niveau que dans la chaudière, ce qui permet de voir à chaque instant la position qu'occupe ce niveau.

Les moyens que nous venons d'énumérer ne peuvent servir à prévenir un abaissement de niveau dans la chaudière, qu'autant que le chauffeur y fait attention ; ils sont souvent inefficaces, en raison de la négligence de cet ouvrier. Aussi a-t-on imaginé un appareil qui a pour objet d'appeler son attention, dans le cas où le

le l'eau éprouverait un trop grand abaissement. Cet appa-
nmé *flotteur d'alarme*, est représenté par la *fig*. 523. Il con-
un flotteur A, fixé à l'extrémité d'un levier ABC, qui
contre-poids C à son autre extrémité. Tant que le niveau

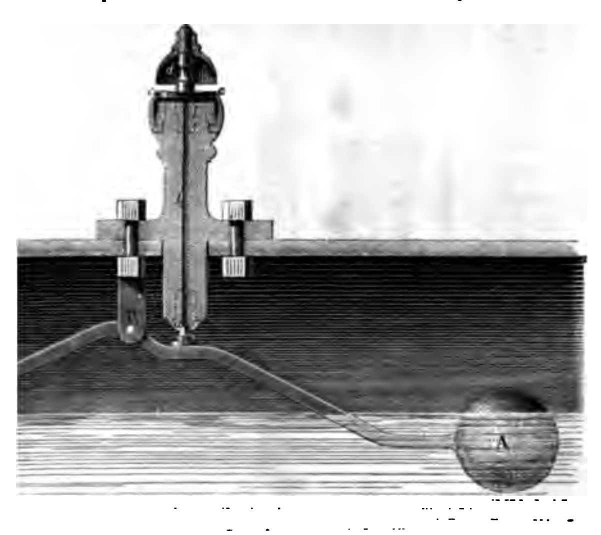


Fig. 523.

élevé dans la chaudière, le flotteur A est poussé de bas en
le liquide ; la pièce conique *a*, portée par le levier, se
nsi appuyée contre l'orifice du tuyau vertical *b*, et ferme
ment cet orifice. Mais si le niveau vient à baisser plus qu'il
faire, le flotteur A s'abaisse avec lui, le bouchon conique
ne plus le tuyau *b*, et la vapeur passe dans ce tuyau, pour
ır par l'ouverture annulaire *cc*. Le jet de vapeur, qui sort
s forme de lame circulaire, vient rencontrer le timbre *d*
uche, sur tout son contour : le timbre se met en vibration,
ésulte un sifflement aigu que tout le monde connaît, pour
ntendu près des locomotives des chemins de fer, dont le
disposé de la même manière.

Indicateur de Watt. — La connaissance de la force élas-
la vapeur dans la chaudière, qui est fournie par les indi-

s du manomètre, ne suffit pas pour qu'on puisse évaluer le
l développé par l'action de la vapeur sur le piston; car la
élastique de la vapeur est ordinairement plus faible dans le
dre que dans la chaudière, à cause des résistances qu'elle
uve toujours en allant de l'une à l'autre. D'un autre côté, lors-
n fait agir la vapeur avec détente, il n'y a plus de commu-
nication entre le cylindre et la chaudière, et par conséquent le manomètre ne peut nullement faire connaître ce qui se passe dans le cylindre. C'est pour ces motifs que, lorsqu'on veu se rendre compte de la ma che d'une machine à v peur, on adapte au cylin un instrument spécial d tiné à faire connaître tension de la vapeur à que instant. Cet instrum dû à Watt, est dé sous le nom d'*indicate Watt*.

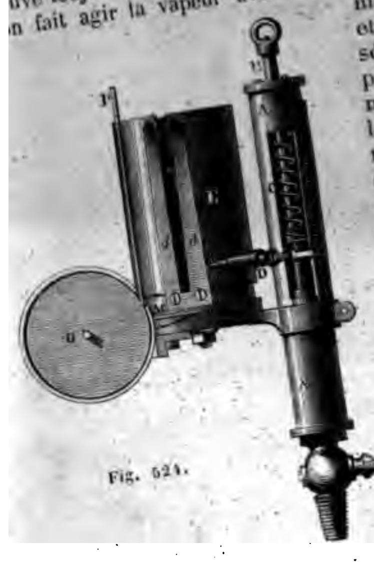


Fig. 524.

Il se compose d'un cylindre A, *fig.* 524, dans lequel se trou piston, dont la tige saillie à son extrém cylindre est garni de vis à sa partie in de manière à po fixer dans une taraudée que l'on dans l'un des fon lindre de la mac peur. Lorsque l'a ainsi installé, la agit dans la ma munique avec l'i cylindre A, et



Fig. 525.

pression plus ou moins grande sur le petit piston qu'il piston cède à l'action de cette pression; et le ressor

entoure sa tige, se comprime d'autant plus que la force élasti-
de la vapeur est plus grande. Un index, que porte la tige du t piston, vient ainsi correspondre à un des points d'une échelle luée que porte le cylindre A, et peut faire connaître la tension a vapeur.

lais la rapidité du mouvement de la machine, jointe à la va-ion qu'éprouve la tension de la vapeur pendant une seule course piston moteur, fait que l'indicateur serait d'un emploi difficile, se réduisait à ce que nous venons de dire. Pour qu'il puisse e employé plus facilement, et fournir en même temps des indi-ions plus précises, on a adapté à la tige B du petit piston un te-crayon D, qui est destiné à imprimer sa trace sur une bande papier enroulée autour du cylindre E. Cette bande est tendue sur la surface du cylindre, et ses deux extrémités y sont mainte-nues par les deux lames de ressort *d*, sous lesquelles elles se trou-vent engagées. Pendant que le piston de la machine à vapeur marche, le cylindre E reçoit un mouvement de rotation autour de son axe, et vient ainsi présenter les diverses parties de la bande de papier à la pointe du crayon. Le mouvement est donné au cylindre E par la machine même. A cet effet, une petite corde P, dont l'ex-trémité supérieure est attachée en un point de la tige du piston de la machine à vapeur, fait plu-sieurs tours sur la surface d'un tambour O; l'axe de ce tambour porte en arrière un petit treuil N, sur lequel s'enroule une se-conde corde M, qui embrasse la gorge d'une sorte de poulie adap-tée au bas du cylindre E, et dont l'extrémité est fixée en un point de cette gorge. Lorsque le piston de la machine à vapeur marche dans un certain sens, il tire la corde P; cette corde fait tourner le tambour O, en se déroulant; la corde M s'enroule sur le treuil N, et fait ainsi tourner le cylin-dre E. Lorsque le piston de la machine à vapeur marche en sens contraire, les diverses pièces reviennent à leur position primitive, par suite de l'action d'un ressort contenu à l'intérieur du cylindre E. En

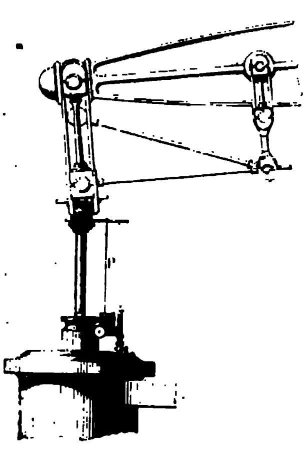


Fig. 526.

sorte que la bande de papier, sur laquelle s'appuie la pointe du crayon, est animée d'un mouvement de rotation alternatif, déterminé par le mouvement alternatif du piston de la machine à vapeur. La *fig.* 526 montre la disposition de l'indicateur, sur le fond supérieur du cylindre d'une machine à cylindre vertical et à balancier.

Pendant que le cylindre E amène successivement les divers parties du papier qui le recouvre, sous la pointe du crayon D, celui-ci marche plus ou moins dans le sens de la longueur du cylindre A, suivant les variations de la force élastique de la vapeur. Il en résulte que le crayon trace sur le papier une ligne courbe, dont la forme dépend à la fois de ces deux mouvements, et dont la considération peut conduire à la connaissance des changements qui sont survenus successivement dans la force élastique de la vapeur. On voit ici, *fig.* 527, une courbe ainsi obtenue à l'aide de l'indicateur de Watt.

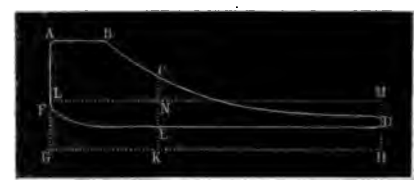


Fig. 527.

La partie ABCD a été tracée par le crayon, pendant que le piston moteur descendait sous l'action de la vapeur: la partie DEF a été tracée pendant que le piston remontait. La ligne GH est celle que la pointe du crayon aurait parcourue, si le vide parfait avait existé dans la partie du cylindre qui était en communication avec l'indicateur. La perpendiculaire CK, abaissée d'un point quelconque C de la courbe sur cette ligne droite GH, mesure donc la quantité dont le petit piston de l'indicateur était repoussé par la pression de la vapeur, au moment où le crayon a marqué le point C; et par suite on peut en conclure la force élastique de la vapeur à ce moment, d'après les expériences faites préalablement, pour graduer l'échelle de l'indicateur. La ligne droite LM est celle qu'aurait tracée le crayon, si la tension de la vapeur eût constamment égalé celle de l'air atmosphérique, c'est-à-dire si le ressort en hélice de l'indicateur n'eût pas été tendu pendant le temps de l'expérience. La partie AB de la courbe correspond au temps pendant lequel la vapeur a agi à pleine pression. On voit qu'ensuite elle a agi avec détente, et que sa force élastique s'est ainsi abaissée au-dessous de celle de l'air atmosphérique. La seconde partie DEF a été tracée lorsque la partie du cylindre à laquelle l'indicateur était appliqué communiquait avec le condenseur:

[redacted]

out le temps que cette communication a existé, la presuée par l'indicateur est restée constante et inférieure à atmosphère, excepté vers la fin, où elle a augmenté par suppression anticipée de cette communication.

ılement la courbe fournie par l'indicateur de Watt permet es modifications que subit successivement la tension de dans le cylindre d'une machine, mais elle peut encore, lue qu'elle occupe sur la feuille de papier, faire conıaleur numérique du travail total développé par l'action ur pendant chaque course du piston. Nous nous contensignaler cette utilité du tracé que donne l'indicateur, sans ıs aucun détail à ce sujet, ce qui nous entraînerait beauloin.

Détails économiques sur l'emploi de la vapeur noteur. — Les combustibles employés pour le chauffage ères à vapeur sont habituellement la houille ou le coke. Il expériences auxquelles on les a soumis, que la combustion amme de houille développe environ 7500 unités de chaleur: o d'un kilogramme de coke en développe environ 6000. s tableaux des pages 612 et 613, on voit que la quantité ır nécessaire pour transformer un kilogramme d'eau apeur saturée ayant une force élastique de 4 à 6 atmosəut être évaluée approximativement à 650 unités de chansuit que, si toute la chaleur développée par la combusuniquement employée à la formation de la vapeur, un ıe de houille produirait $14^k,5$ de vapeur; et un kilogramme ı produirait $9^k,2$. Mais il n'est pas possible d'utiliser ainsi de la chaleur développée. D'une part, les gaz qui résulcombustion même, et qui se dégagent par la cheminée, sairement une température assez élevée, et entraînent raction notable de la chaleur produite. D'une autre part, rrive dans le foyer pour entretenir la combustion congrande quantité d'azote: et de plus une portion seulement ygène est réellement employée : en sorte qu'un masse ole de gaz inutile passe dans le foyer, se mêle aux procombustion, et absorbe ainsi une autre portion de la veloppée. Si l'on joint à cela que la combustion est rareplète dans les fourneaux des chaudières à vapeur, et que se perd en partie, tant par le rayonnement extérieur que nission de proche en proche dans la masse du fourneau, que dans la réalité on doit être loin d'obtenir les résultats précédemment. L'expérience montre en effet que, dans les

ncaux les mieux construits, le poids de l'eau vaporisée par kilogramme de houille est seulement de 7 à 8 kilogrammes.

En appliquant le frein dynamométrique (§ 199) à l'arbre auquel une machine à vapeur communique un mouvement de rotation, afin de déterminer la quantité de travail que la machine est capable de produire, on a trouvé que, dans les bonnes machines à détente et à condensation, 1 kilogramme de vapeur fournit environ 30 000 kilogrammètres de travail utile. Et si l'on tient compte de ce q
nous avons dit relativement à la quantité de vapeur produite
un kilogramme de houille, on verra que la consommation
combustible, par force de cheval et par heure, est d'enviro

§ 443. Pour atteindre les résultats qui viennent d'être i
il est nécessaire d'employer tous les moyens possibles p
poser à la condensation de la vapeur, depuis le moment
forme dans la chaudière, jusqu'au moment où elle ces
tement d'agir dans la machine. A cet effet, le tuyau
vapeur de la chaudière à la machine doit être envel
tières peu conductrices, telles que des nattes de pa
ou mieux encore de la laine. Il faut aussi que le cy
servé du rayonnement extérieur. On y parvient en
de lui un second cylindre de dimensions un pe
faisant circuler de la vapeur dans l'espace annu
les deux, espace auquel on donne le nom de che
peut être remplacé avec avantage par un aut
tourer le cylindre d'une couche de charbon p
enveloppe de bois.

Si la température du cylindre d'une mach
suffisamment élevée, par l'emploi de moyen
nent d'être indiqués, il en résulte une
plus grande qu'on ne pourrait le croire
blerait en effet qu'il ne doit y avoir
qui se condense pour restituer au c
par le rayonnement extérieur : mais
naît sans peine que la quantité de
coup plus grande. En effet, lorsqu
dans le cylindre, elle se condens
la température des parois avec l
lorsqu'elle a agi complètement
nication avec le conden
fique; et l'eau p
indre se

duit dans le cylindre même, en refroidit les parois; et lorsque de nouvelle vapeur vient de la chaudière, elle donne lieu à la reproduction des mêmes circonstances. On conçoit dès lors combien il est important de s'opposer au refroidissement du cylindre par le rayonnement extérieur, puisque c'est une des causes de ces condensations et vaporisations successives à son intérieur.

Lorsque le tuyau qui amène la vapeur de la chaudière à la machine la prend à peu de distance de la surface du liquide en ébullition, elle contient de l'eau en suspension, qui est ainsi entraînée jusque dans le cylindre. Cette eau occasionne une perte notable, non seulement parce que la chaleur qui a servi à élever sa température ne produit aucun effet, mais surtout parce qu'étant arrivée dans le cylindre, elle s'y vaporise comme on vient de l'expliquer, et y produit un abaissement notable de la température des parois. Aussi doit-on faire en sorte que la prise de vapeur, dans la chaudière, se fasse de manière à éviter cette circonstance défavorable. On y arrive en surmontant la chaudière d'une capacité dans laquelle la vapeur s'accumule, et en faisant partir le tuyau du haut de ce réservoir de vapeur. Par ce moyen, l'eau contenue en suspension dans la vapeur se dépose peu à peu en retombant dans la chaudière; et la vapeur qui se trouve dans le haut du réservoir en est à peu près complétement débarrassée.

§ 144. **Machine à vapeurs combinées.** — On n'utilise en réalité, dans les machines à vapeur, qu'une très petite portion de la chaleur employée à la production de la vapeur. On voit, en effet, qu'au moment où la vapeur cesse d'agir dans le cylindre, et où on la fait communiquer, soit avec le condenseur, soit avec l'atmosphère, elle contient encore une quantité de chaleur considérable, dont la plus grande partie est à l'état latent. On a eu l'idée d'utiliser cette chaleur en l'employant à la vaporisation d'un liquide plus volatil que l'eau, de manière à faire servir la vapeur de ce liquide à la production d'une nouvelle quantité de travail. On a pris successivement pour ce second liquide, de l'éther, du sulfure de carbone, du perchlorure de carbone, et du chloroforme; c'est à ce dernier qu'on s'est arrêté.

Les machines construites d'après cette idée sont mises en mouvement à la fois par la vapeur d'eau et par la vapeur de chloroforme: on les désigne sous le nom de *machines à vapeurs combinées*. Deux pistons séparés se meuvent chacun dans un cylindre, et reçoivent, l'un l'action de la vapeur d'eau, l'autre celle de la vapeur de chloroforme: ces deux pistons sont employés simultanément pour agir sur un même arbre tournant. Lorsque la vapeur d'eau a cessé

ns le cylindre qui lui est destiné, elle se rend dans une
où elle se condense par le contact de vases spéciaux con-
le chloroforme. Ce liquide se vaporise en même temps, et sa
ayant une force élastique assez grande, vient agir dans le
d cylindre, pendant que de nouvelle vapeur d'eau agit dans le
lier. Enfin la vapeur de chloroforme, après avoir exercé son
on, passe dans une capacité où elle est condensée par l'eau
ide qui rafraîchit constamment les parois extérieures des vas
i la contiennent.

Il est bien clair que l'emploi simultané de la vapeur d'eau e
la vapeur d'un liquide plus volatil doit amener une grande éc
mie de combustible. Mais cette économie est accompagnée
perte d'une partie du liquide volatil que l'on emploie, pert
peut rendre assez faible, mais qu'on ne peut pas éviter co
ment, et qui a une importance d'autant plus grande que c
est plus cher. Il paraît cependant que les machines
combinées que l'on a employées jusqu'à présent ont don
résultats, au point de vue économique.

§ 443. **Machine à air chaud d'Ericsson.** —
dont nous venons de parler, pour utiliser une partie d
que la vapeur renferme surtout à l'état latent, lorsq
d'agir dans une machine à vapeur, ne remédie que t
à la perte énorme de chaleur que nous avons signal
cement du paragraphe précédent. Aussi a-t-on c
moyens pour éviter cette perte.

On a pensé avec raison depuis longtemps qu'u
manières d'y arriver consisterait à substituer l'air
d'eau. On comprend, en effet, que si l'on peut
élastique d'une masse d'air contenue dans une
élevant sa température, et ensuite faire-agir c
machine disposée de la même manière qu'un
en le laissant échapper dans l'atmosphère a
son action sur le piston de la machine, au
de la machine, il conservera encore une p
lui aura été communiquée; mais cette cha
que l'on veut produire, sera une fraction
de la chaleur totale que l'on aura dépens
à vapeur: on ne retrouve pas dans ce cas
chaleur qui passe à l'état latent dan
vapeur, et qui est emportée par la v
d'agir, sans qu'il en résulte la prod
travail.

Cependant on n'était pas parvenu jusqu'à ces derniers temps à réaliser une machine à air chaud qui pût lutter avantageusement avec les machines à vapeur. La principale difficulté consistait en ce que, si l'on ne voulait pas élever beaucoup la température de l'air, on se trouvait obligé de donner à la machine des dimensions incomparablement plus grandes que celles d'une machine à vapeur de même force; et que d'un autre côté, si, pour diminuer ces dimensions, on se décidait à porter l'air à une température très élevée, il en résultait des inconvénients d'un autre genre, et en particulier une perte de chaleur comparable à celle qu'occasionnent les machines à vapeur. M. Ericsson vient de lever ces difficultés d'une manière très heureuse, en adoptant une disposition particulière que nous allons faire connaître.

Lorsque l'air chaud a cessé d'agir dans la machine, et qu'on le laisse s'échapper dans l'atmosphère, il emporte avec lui une grande partie de la chaleur qui lui a été donnée tout d'abord. Si l'on pouvait lui reprendre cette chaleur pour la faire servir à l'échauffement d'une nouvelle quantité d'air, il est clair que l'on aurait obvié à l'inconvénient principal des machines à feu, c'est-à-dire à la perte d'une portion considérable de la chaleur dépensée. Or, c'est précisément là ce que fait M. Ericsson. Dans la machine qu'il a imaginée, l'air chaud sort du cylindre pour se rendre dans l'atmosphère, en traversant un grand nombre de toiles métalliques: cet air se trouve ainsi en contact avec une très grande surface du métal qui forme ces toiles, et lui abandonne la presque totalité de l'excès de chaleur qu'il renferme. Ensuite, lorsqu'une nouvelle quantité d'air doit arriver dans le cylindre de la machine, après avoir été préalablement chauffé, cet air traverse d'abord les mêmes toiles métalliques, qui lui restituent la chaleur enlevée à l'air sortant; et il suffit de lui donner en outre une faible augmentation de température, en le soumettant à l'influence d'un foyer, pour qu'il puisse agir convenablement sur le piston de la machine.

La *fig.* 528 représente une des machines construites par M. Ericsson, d'après le système que nous venons d'indiquer: cette machine fonctionne dans un des ateliers de New-York. Un piston A se meut dans un cylindre B, qui communique librement avec l'atmosphère par les ouvertures *a*, *a*. Un second piston C, lié invariablement au premier par les tiges de fer *d*, *d*, et d'un diamètre notablement plus petit, se meut en même temps dans un cylindre D qui surmonte le cylindre B; la partie du cylindre D qui se trouve au-dessous du piston C communique également avec l'atmosphère par les ouvertures *a*, *a*. Le piston C est muni d'une tige F qui tra-

nd supérieur du cylindre D, et va s'articuler à l'une des
d'un balancier qui n'est pas représenté ici. Un réservoir
e F est installé à côté des cylindres B, D, et est destiné
er de l'air comprimé. Le haut du cylindre D communique
t avec l'atmosphère par la soupape c s'ouvrant de haut en
l'une autre part avec le réservoir F par la soupape e s'ou-
bas en haut. L'air contenu dans le réservoir F peut se
ans le cylindre B, en traversant l'ouverture de la soupape b,

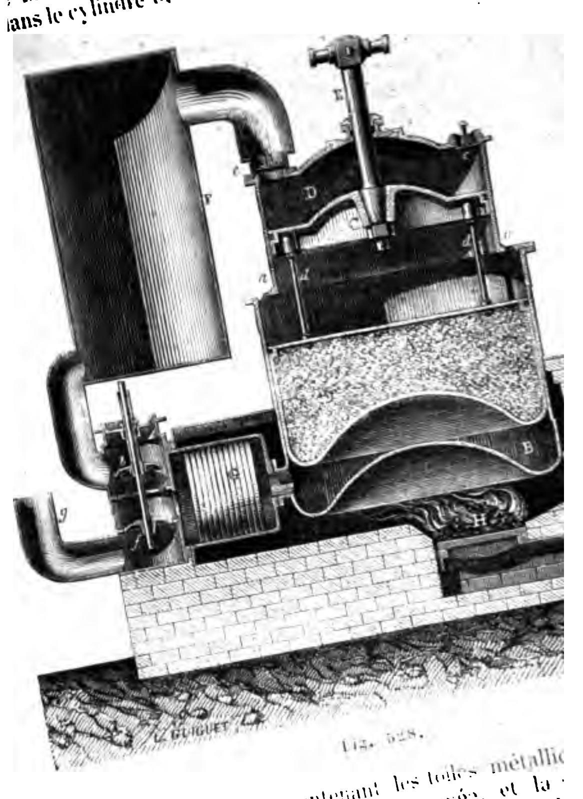


Fig. 528.

ainsi que l'espace G contenant les toiles métallic
avons parlé. La soupape b étant fermée, et la
ouverte, l'air contenu dans le cylindre B peut s'éc

[redacted]

osphère en traversant les toiles métalliques G, l'ouverture de la upape *f*, et le tuyau de dégagement *g*. Un foyer H est installé sous fond du cylindre B, et la flamme qui s'en échappe circule dans un pace vide ménagé autour de la partie inférieure de ce cylindre, 'ant de se rendre dans la cheminée. Le piston A présente une sez grande épaisseur, et est rempli à son intérieur d'un mélange argile et de charbon en poudre, pour éviter que la chaleur ne se erde en le traversant.

Voici maintenant comment la machine fonctionne. La soupape *b* ant ouverte, et la soupape *f* fermée, l'air comprimé du réservoir F e rend dans le cylindre B, en traversant les toiles métalliques G. s'échauffe d'abord par le contact des fils qui composent ces toiles, t ensuite par l'action du foyer H, qui se transmet à lui par l'interiédiaire des parois du cylindre B. Le piston A monte sous la presion qu'il éprouve de la part de cet air, dont la force élastique est upérieure à celle de l'air atmosphérique, et fait monter en même emps que lui le piston C. L'air contenu au-dessus de ce second iston, et qui s'y est précédemment introduit par la soupape *c*, est omprimé et refoulé dans le réservoir F par la soupape *e* : en sorte que le réservoir perd d'un côté une portion de l'air qu'il renfermait, et en gagne d'un autre côté une quantité égale, ce qui entretient ne pression constante à son intérieur. Lorsque les deux pisons A, C, se sont ainsi élevés jusqu'à la partie supérieure de leur ourse, la soupape *b* se ferme, et la soupape *f* s'ouvre ; l'air contenu u-dessous du piston A peut donc se rendre dans l'atmosphère, en raversant les toiles métalliques G en sens contraire du sens dans equel il les avait traversées précédemment. Alors les pistons A, C redescendent en vertu de leur propre poids, ou bien par l'action de contre-poids disposés pour cela ; en même temps la soupape *e* se ferme et la soupape *c* s'ouvre, de sorte que le haut du cylindre D se remplit d'air atmosphérique venant par cette dernière soupape. Lorsque les pistons A, C, sont arrivés au bas de leur course, la soupape *f* se ferme, la soupape *b* s'ouvre, et le jeu de la machine recommence comme précédemment.

On voit que cette machine est à simple effet ; la force élastique de l'air ne sert qu'à pousser la tige E de bas en haut, et ne contribue en aucune manière à la faire redescendre. Mais deux machines de ce genre, agissant alternativement aux deux extrémités d'un même balancier, le font mouvoir en définitive de la même manière qu'une machine à double effet agissant sur une seule de ces deux extrémités.

L'expérience a déjà montré d'une manière incontestable que, à

... fait un très grand ... et il est probable que ... l'état d'enfance, et il est probable ... des perfectionnements qui augmenteront notablement ... oir des perfectionnements qui augmenteront notablement ... ntages qu'elle présente déjà.

.6. **Bateaux à vapeur**. — La première idée d'appliquer la ... à la navigation est due à Papin. Il l'a développée dans un ... ge imprimé en 1695, en indiquant un moyen de transformer ... uvement rectiligne alternatif d'un piston, en un mouvement de ... on continu de l'arbre qui porte à ses extrémités les rames ... *antes* ou roues.

... 1775, Périer construisit à Paris le premier bateau auquel on ... enté d'appliquer la vapeur. Ce bateau ne servit qu'à faire des ... riences.

... n 1781, Jouffroy établit sur la Saône un bateau à vapeur qui ... igua réellement pendant quelque temps.

Mais ce n'est qu'en 1807 que l'on trouve le premier bateau à va... ur auquel on n'ait pas renoncé après l'avoir essayé. Ce bateau ... construit par Fulton à New-York (Amérique), et fut employé au ... ansport des voyageurs et des marchandises. Quelques années ... près, en 1812, un bateau du même genre fut mis en activité en ... ngleterre. Depuis cette époque, la navigation à la vapeur a fait ... les progrès immenses, et a pris un développement considérable.

La disposition adoptée, pour appliquer la force de la vapeur à la production du mouvement du bateau, est facile à comprendre, d'a... près ce que nous avons dit des machines à vapeur. Il suffit en effet ... les moyens indiqués pour transformer le mouvement ... d'une machine, en un mouvement de rota... à ses deux extrémités ...

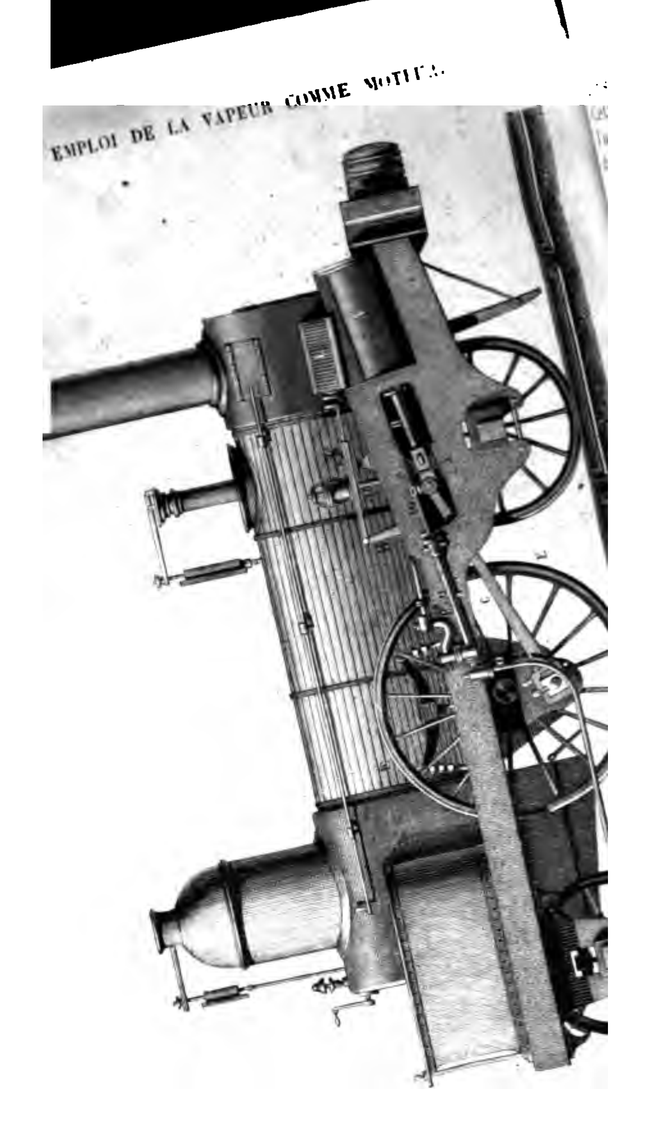
ıire d'une manivelle (§ 430); lorsque l'une des manivelles ée de manière que le piston qui lui correspond ne puisse ; que peu d'effet, l'autre, au contraire, se trouve dans des ns convenables pour que le second piston développe toute on.

'. **Locomotives.** — L'invention des locomotives, dont on se r traîner les convois de wagons sur les chemins de fer, est cente. Cependant les essais auxquels on s'est livré pour re des voitures mues par la vapeur remontent jusqu'à 1769. A cette époque, un ingénieur français, Cugnot, conıne voiture à vapeur destinée à marcher sur les routes ordi- Les expériences faites sur cette voiture réussirent, en ce) la vapeur la mettait en mouvement sur le sol, et lui don- vitesse d'environ 4 kilomètres par heure; mais ce mouve- pouvait s'entretenir que peu de temps, parce que la chau- était pas capable de fournir assez de vapeur pour la nation de la machine.

avons dit (§ 436) qu'une chaudière ne pouvait fournir une donnée de vapeur, dans un temps déterminé, qu'autant urface de chauffe avait une étendue suffisamment grande. lifficulté de satisfaire à cette condition, dans la construction ıaudière portée par la voiture elle-même, qui a fait que les ssais auxquels on s'est livré sont restés longtemps sans On ne pouvait pas parvenir à donner à la surface de chauffe audière une étendue qui fût en rapport avec la grande de vapeur que nécessite la marche rapide d'une locomotive. qu'en 1828 que ce problème fut résolu de la manière la reuse par M. Séguin. La forme qu'il a imaginée pour les es des locomotives est celle qu'on leur donne encore main- Nous verrons en quoi consiste cette forme, en donnant la on complète d'une locomotive.

. La *fig.* 529 représente une des locomotives du chemin de ıris à Rouen; la *fig.* 530 en est une coupe longitudinale, . 532 et 533 en sont des coupes transversales faites aux rémités.

cylindres A, *fig.* 529, sont placés à l'avant de la locomotive, aque côté. Ces deux cylindres sont ici légèrement inclinés; ıvent ils sont placés horizontalement. Un piston se meut cun de ces deux cylindres, et y reçoit l'action de la vapeur, ır une de ses faces, tantôt sur l'autre. Cela constitue donc é deux machines à vapeur à double effet, comme dans les à vapeur (§ 446). La tige B de chaque piston est dirigée



›n mouvement par les glissières *a*, *a*, fixées à son extrémité. ige est articulée à une bielle C, qui saisit un bouton D fixé à ›s roues motrices E ; ce bouton, situé à une certaine distance tre de la roue, fait fonction de manivelle. On conçoit donc mouvement de va-et-vient du piston détermine le mouvele rotation des roues motrices. Les deux manivelles, sur les agissent les deux pistons, sont d'ailleurs disposées à lroit l'une sur l'autre, comme cela a lieu dans les bateaux à (§ 446), et pour le même motif.

listribution de la vapeur dans le cylindre se fait au moyen de mus par des excentriques circulaires que porte l'essieu des notrices. Le mécanisme de la distribution se voit en partie *fig*. 530. L'excentrique F donne un mouvement de va-et-vient elle G ; cette bielle se termine en *b* par une encoche qui saisit mité inférieure d'un levier H, *fig*. 529 ; ce levier, mobile de son milieu, prend un mouvement d'oscillation, par suite iaison à l'excentrique, et donne lieu au mouvement de va-etle la tige K du tiroir qui est contenu dans la boîte à vapeur L. locomotive devant pouvoir marcher à volonté dans un sens ou 'autre, il est nécessaire que le mécanicien ait à sa disposition sibilité de modifier la distribution de la vapeur, de manière à niner tantôt la marche en avant, tantôt la marche en arrière. aisé de voir ce qu'il faut faire pour cela. Lorsque l'un des ıs se trouve au milieu de sa course, la vapeur doit le presser ı face antérieure ou sur sa face postérieure, suivant que la ıotive marche dans un sens ou dans l'autre ; dans l'un de ces cas, le tiroir doit se trouver vers l'une des extrémités de la à vapeur ; et dans l'autre cas, il doit se trouver vers l'extréopposée. On voit donc que, pour changer le sens de la marche, fit de faire conduire le tiroir par un second excentrique, qui ›lacé autrement que le premier sur l'essieu des roues motrices. pour cela que cet essieu porte deux excentriques F, F′, pour re en mouvement chacun des tiroirs. Les bielles G, G′, mues es excentriques, se terminent par deux encoches *b*, *b′*, tournées ons contraires, et destinées à saisir l'une ou l'autre le bouton té à l'extrémité inférieure du levier vertical H. Un levier coudé mobile autour du point *d*, sert à soutenir les encoches *b*, *b′*, à hauteur convenable, au moyen de deux tringles qui partent ›int *e*. Une longue tringle *f*, articulée à l'extrémité *c* de ce levier, se terminer à la portée du mécanicien, qui, en la tirant, ou ›ussant, peut ainsi faire saisir le bras de levier H par l'ene *b*, ou par l'encoche *b′*.

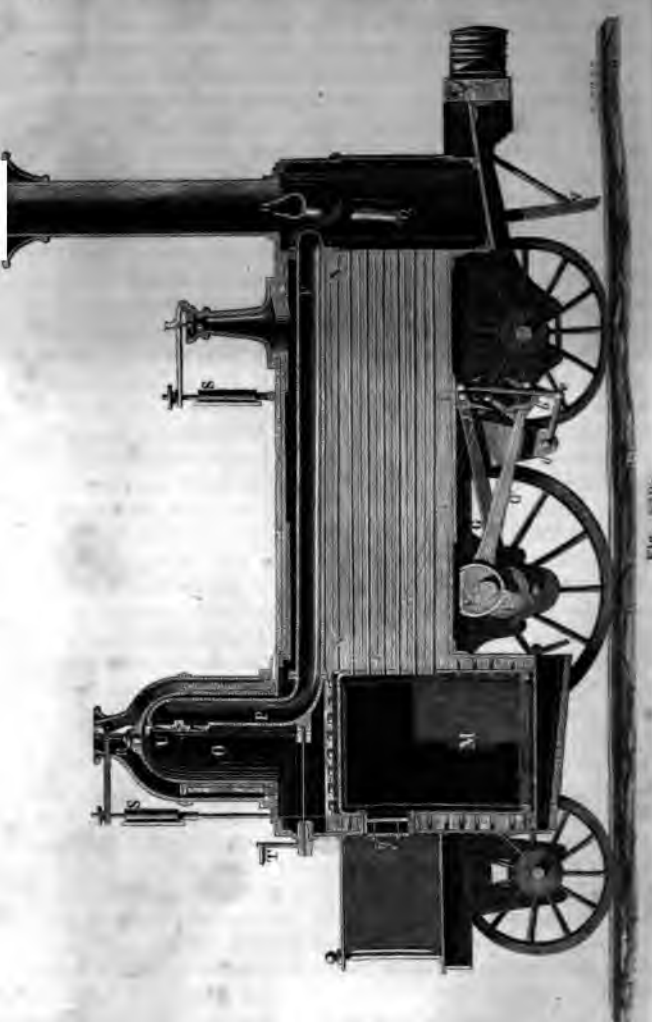


Fig. 510.

n qui vient d'être indiquée, pour changer à volonté
marche d'une locomotive, est celle qui avait été
abord. Elle est généralement remplacée par une
n, *fig*. 531, qui n'est qu'une simple modification de
ais qui présente de grands avantages. Au lieu que
d'excentriques G, G', portent à leurs extrémités
b, *b'*, *fig*. 530, destinées à saisir l'une ou l'autre le
ermédiaire duquel le mouvement de va-et-vient est
oir, on a réuni les extrémités de ces bielles par une
. 531, dans laquelle s'engage ce bouton *m*. La cou-
ainsi dire,
réunion
hes, dont
ieu d'aller
pour pou-
acilement
roir, s'al-
ntraire en
es, de ma-
sans dis-
extrémité
ux bielles
e l'autre.
tte modi-
comprend
eut chan-
la marche
e, en éle-
nt les ex-
ux bielles
, par le
ior coudé
ngle *f*, on
indre que
e soit pas
ement par
la bielle
on veut le
tion. Mais
coulisse
avantage



Fig. 531.

rtant. Si on la soulève ou qu'on l'abaisse, de ma-

nière que le bouton *m* soit à l'une ou à l'autre de ses extrémités, le tiroir ne reçoit son mouvement de va-et-vient que de l'un des deux excentriques, de celui dont la bielle aboutit directement au bouton *m*; la seconde bielle se meut en faisant osciller la coulisse, sans qu'il en résulte aucune influence sur le mouvement du tiroir, qui s'effectue exactement de la même manière que si cette seconde bielle et la coulisse n'existaient pas. Mais si l'on ne donne pas tout à fait à la coulisse l'une des deux positions extrêmes que nous venons de considérer, si on la maintient à une hauteur telle que le bouton *m* se trouve à une certaine distance de l'une de ses extrémités, ce bouton recevra et transmettra au tiroir un mouvement de va-et-vient qui ne sera pas produit par un seul des deux excentriques; la coulisse, en oscillant sous l'action simultanée des deux bielles G, G', fera mouvoir le bouton *m* autrement qu'il ne se mouvrait sous l'action d'une seule de ces bielles. Or on a reconnu qu'ainsi la vapeur agit avec un degré de détente différent, suivant que le bouton *m* est dans telle ou telle position par rapport aux extrémités de la coulisse : l'emploi de cette coulisse permet donc de faire varier à volonté la détente de la vapeur, pendant que la locomotive est en marche, ce qui est un résultat des plus importants (§ 432). Pour produire la marche en avant, il faut que le bouton *m* soit dans l'une des deux moitiés de la coulisse, et pour la marche en arrière, il doit être dans l'autre moitié ; on fait varier la détente dans l'un ou l'autre cas, en soulevant la coulisse de telle manière que le bouton *m* occupe des positions differentes dans chacune de ces deux moitiés. Le contre-poids *n* est destiné à équilibrer le poids de la coulisse et des deux bielles d'excentrique, afin que l'ensemble de ces pièces puisse être plus facilement maintenu à la hauteur voulue, suivant le sens dans lequel on veut faire marcher la locomotive et le degré de détente que l'on veut produire. La coulisse dont nous venons de faire connaître les avantages est habituellement désignée sous le nom de *coulisse de Stephenson* : l'ingénieur anglais Stephenson est le premier qui l'ait introduite dans la construction des locomotives.

Le foyer de la locomotive est en M. Le combustible, qui est ordinairement du coke, s'introduit par une petite porte *g*. Le foyer est entouré de tous côtés par deux enveloppes, entre lesquelles se répand une partie de l'eau de la chaudière ; son fond supérieur est également recouvert d'une certaine épaisseur d'eau. La flamme, en quittant le foyer, traverse un grand nombre de tubes qui sont établis à côté les uns des autres, dans le sens de la longueur de la locomotive, et entre lesquels se trouve la plus grande partie de

[redacted]

vaporiser ; les gaz qui résultent de la combustion se ren-
nsi dans un espace situé à l'avant de la locomotive, et
›pent par la cheminée qui surmonte cet espace.

ig. 532, qui est une coupe transversale faite dans le foyer,
› les extrémités de
›es, dont le nombre
jusqu'à 100 et
150 ; leur diamètre
4 à 5 centimètres.
ılte de cette disposi-
que la surface de
e peut atteindre une
ıe de 50 mètres car-
t c'est cette circon-
› qui permet à la
ıotive de produire la
de quantité de va-
qu'elle consomme
sa marche rapide.
e corps de la chau-
› consiste principale-
t en un cylindre hori-
al N, au milieu duquel
installés les nom-
x tubes dont nous
›ns de parler. Un ré-
oir de vapeur O est
é immédiatement au-
us du foyer. Un large
u A part du haut de
·éservoir, traverse la chaudière dans toute sa longueur, et
t se rendre à l'extrémité antérieure de la locomotive, où il se
se en deux pour conduire la vapeur dans les cylindres. Lorsque
apeur a cessé d'agir sur les pistons, elle s'échappe par deux
ux Q, dont la disposition est indiquée par la *fig*. 533, qui est
coupe transversale faite dans la partie antérieure de la loco-
ve. Ces deux tuyaux se réunissent à leurs extrémités, et dé-
·hent au bas de la cheminée ; il en résulte que la vapeur, en
tant les cylindres, est lancée suivant l'axe de la cheminée, et
ıt de vapeur, qui se reproduit ainsi à chaque instant, pendant
ıarche de la machine, active le tirage, et, par suite, la com-
tion dans le foyer.



Fig 532.

Deux soupapes de sûreté R, *fig.* 530, sont installées sur la chaudière, afin de s'opposer à ce que la tension de la vapeur ne dépasse la limite pour laquelle la chaudière a été construite. Les leviers qui pressent sur ces soupapes ne sont pas chargés de poids, comme dans les machines fixes, parce que les irrégularités qui se présentent toujours dans le mouvement gêneraient l'action de ces poids. Au lieu de cela chacun de ces leviers est soumis, à son extrémité, à une force de traction produite par un ressort contenu dans une enveloppe S; et l'on règle la grandeur de cette force de traction en serrant convenablement l'écrou adapté à la tige qui part du ressort, et situé au-dessus du levier de la soupape.



Fig. 533.

La manivelle T, placée à la portée du mécanicien sert à ouvrir ou fermer l'entrée U du tuyau P, *fig.* 530 et 532. Lorsque la locomotive est arrêtée, il suffit de tourner cette manivelle, pour que la vapeur pénétrant dans le tuyau P, et par suite dans les cylindres, vienne presser les pistons et mettre la machine en mouvement. Si l'on veut faire cesser l'action de la vapeur, on tourne cette manivelle en sens contraire, et le mouvement ne continue plus qu'en vertu de la vitesse acquise ; dans ce cas les pistons se meuvent toujours dans les cylindres, par suite de leur liaison avec les roues motrices ; mais ils n'exercent sur la marche de la locomotive qu'une action de résistance, en raison des frottements qu'occasionne leur mouvement.

La pièce V, que l'on voit à l'avant de la locomotive, *fig.* 529 et 530, est destinée à débarrasser les rails des obstacles qui pourraient s'y trouver accidentellement, et qui pourraient occa-

ın déraillement. Cette pièce porte le nom de *chasse-pierre.*
agon spécial, auquel on donne le nom de *tender*, suit tou-
locomotive, et lui sert de réservoir pour l'eau et le combus-
est dans le tender que l'eau est constamment puisée par
ɔes alimentaires de la machine, pour être introduite dans la
·e, et y entretenir un niveau constant. Chaque piston moteur
omotive fait mouvoir une pompe alimentaire, dont on voit
ıition complète sur la *fig*. 529. La tige *m* du piston de cette
st attachée à l'extrémité de la tige du piston moteur. Le
ent de va-et-vient de ce dernier piston détermine en consé-
un mouvement analogue du premier, dans le petit corps de
ι. L'eau du tender se trouve ainsi aspirée, par le tuyau *o*, et
refoulée par le tuyau *p*, qui la conduit à l'intérieur de la chau-
Des soupapes sont installées dans ces deux tuyaux, de part
re du corps de pompe *n*, de manière à permettre à l'eau de
oir dans le sens que nous venons d'indiquer, et à s'opposer
elle prenne le mouvement contraire.

EMPLOI DE L'ÉLECTRICITÉ COMME MOTEUR.

9. Ce n'est que depuis un petit nombre d'années qu'on a
le moyen d'employer l'électricité comme force motrice.
des machines que l'on a imaginées pour cela est jusqu'a
extrêmement restreint ; mais nous n'en devons pas moins
nnaître le principe, tant parce qu'on y voit une application
énieuse des progrès des sciences, que parce que ce genre de
;s est peut-être destiné à prendre une place importante parmi
;urs dont se sert l'industrie.
devons naturellement nous occuper tout d'abord d'indiquer
n que l'on a imaginé pour développer une force à l'aide de
cité. Nous verrons ensuite quel parti on a pu, jusqu'à pré-
·er de cette force.
). **Électro-aimant.**—Supposons que l'on prenne un mor-
fer doux, ayant par exemple la forme d'un cylindre, et qu'on
autour de lui un fil métallique enveloppé de soie, en lui
faire un grand nombre de tours. Si l'on vient à faire passer
de ce fil métallique un courant d'électricité produit par une
cylindre de fer doux se trouve immédiatement transformé
imant ; l'aimantation disparaît aussitôt que le courant élec-
esse de passer.
eut courber le morceau de fer, pour lui donner la forme d'un
eval, comme on le voit sur la *fig*. 534. Lorsque le courant
ue est établi, l'aimant artificiel AA se trouve avoir ses

deux pôles rapprochés l'un de l'autre ; et l'on peut les mettre en contact avec un second morceau de fer B, supportant un poids qui est ainsi soutenu par l'aimant, si son énergie est suffisante. Dès qu'on supprime le courant électrique, la force qui supportait la pièce B est anéantie, et cette pièce tombe.

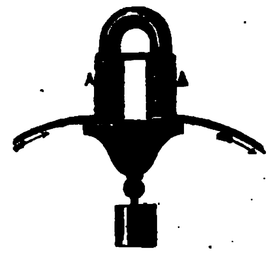


Fig. 634.

Un morceau de fer doux, disposé comme nous venons de le dire, au milieu d'un grand nombre de spires d'un fil métallique enveloppé de soie, prend le nom d'*électro-aimant*. Souvent un électro-aimant, au lieu d'être un cylindre de fer courbé en fer à cheval, est formé de deux cylindres de fer placés à côté l'un de l'autre, et réunis à l'une de leurs extrémités par une pièce de fer transversale qui leur est fixée.

§ 451. **Télégraphe électrique**. — L'invention toute récente et si merveilleuse du télégraphe électrique est fondée sur la propriété de l'électro-aimant de prendre et de perdre l'aimantation avec une extrême rapidité, suivant qu'on établit ou qu'on interrompt le courant électrique, lors même que la longueur du fil dans lequel passe ce courant est très considérable. Il est aisé de concevoir en effet comment on peut utiliser cette propriété, pour déterminer presque instantanément la production de divers signes à une très grande distance.

Imaginons pour cela qu'une pile soit établie à Paris, par exemple, qu'un fil métallique parte du pôle positif de cette pile, et aille jusqu'à Rouen ; que là ce fil s'enroule un grand nombre de fois autour d'un morceau de fer disposé en fer à cheval, de manière à constituer un électro-aimant : et qu'enfin le fil revienne à Paris, pour se réunir au pôle négatif de la pile. Il suffira d'établir et d'interrompre successivement le courant à Paris, pour produire et supprimer aussitôt l'aimantation de l'électro-aimant situé à Rouen. Supposons de plus que l'on ait disposé, tout près des pôles de cet électro-aimant, un morceau de fer doux qui soit mobile, de manière à pouvoir se mettre en contact avec ces pôles, et qui en soit cependant écarté par un léger ressort. Au moment où l'on établira le courant électrique à Paris, ce morceau de fer sera attiré par l'aimant, et viendra se mettre en contact avec lui, en faisant céder le petit ressort qui le retient : aussitôt que l'on interrompra le courant, l'aimantation disparaîtra, et le morceau de fer doux n'étant plus attiré,

à l'action du ressort qui tend constamment à l'éloigner de 'o-aimant. En établissant et interrompant successivement ırs fois de suite le courant à Paris, on donnera lieu à un ment de va-et-vient de la pièce de fer, qui est en présence ectro-aimant à Rouen, et l'on pourra se servir de ce mouve-)our produire les signes qu'on voudra. Tel est le principe de ·graphie électrique.

. appareils destinés à appliquer ce principe sont très divers. décrirons, comme exemple, le télégraphe à cadran, qui est employé. La *fig.* 535 représente un télégraphe de ce genre sé spécialement par M. Froment, de manière à en faciliter la nstration. Le cadran de droite est installé dans le lieu où se e la pile qui fournit l'électricité; celui de gauche est placé le second lieu, avec lequel on veut correspondre. Les deux , *b* sont en communication avec les deux pôles de la pile, le ier *a* avec le pôle positif, et le second *b* avec le pôle négatif. jue le courant est établi, il part du pôle positif, passe par le et vient se rendre dans le montant métallique *c*; de là il tra-: la roue *d*, descend par le montant *e*, et quitte le premier appa-)ar le fil *f*. Ce courant pénètre dans le second appareil par le , suit ce fil qui s'enroule autour d'un électro-aimant situé en re, vient passer en *g*, puis retourne en traversant la pièce *h*, iitte le second appareil par le fil *k*. Enfin il revient en *k'* dans emier appareil, traverse la pièce *l*, et aboutit au pôle négatif pile par le fil *b*.

)ur établir et interrompre successivement le courant, il suffit de tourner la roue *d*, en saisissant le bouton *m* que porte l'ai-e fixée à son axe. Cette roue est garnie de dents qui viennent essivement rencontrer des espèces de cames fixées aux extré-s des montants *c*, *e*; elle ne peut tourner qu'autant que ses s repoussent les cames, en faisant fléchir les pièces *c*, *e*. Les es sont disposées de manière que la roue *d* touche toujours la : *c* par une de ses dents, quelle que soit la position qu'on lui ie; tandis que la came de la pièce *e* se trouve entre deux s de la roue *d*, sans toucher ni l'une ni l'autre, chaque fois l'aiguille correspond à une des lettres que porte le cadran Il ·ésulte que le courant électrique ne passe pas le long du fil, que l'aiguille est arrêtée sur une des lettres, puisqu'il y a solu-de continuité entre la roue *d* et le montant *e*. Lorqu'on fait tour-l'aiguille, pour l'amener d'une lettre à la suivante, de la lettre X lettre Y par exemple, une des dents de la roue vient toucher ime de la pièce *e*, puis l'abandonne presque aussitôt; ce contact



Fig. 535.

au moment où l'aiguille correspond au trait qui sépare
ttres, et le courant s'établit en conséquence ; le courant est
u interrompu, lorsque l'aiguille est arrivée sur la lettre Y.
maintenant comment les alternatives d'existence et d'in-
du courant électrique peuvent faire mouvoir l'aiguille
cadran, de manière à lui donner toujours la même posi-
la première, c'est-à-dire à la faire toujours correspondre
e lettre. Tout près de l'électro-aimant A, *fig.* 536 et 537,
stallé en arrière du cadran de gauche, se trouve une pièce
destinée à être attirée par l'aimant, chaque fois que le
lectrique est établi. Cette pièce de fer est fixée à un le-
mobile autour du point C. Une petite lame de ressort
u même levier CD, est pressée sur sa face supérieure
nte d'une vis, qui lui donne ainsi une tension suffisante
ter le morceau de fer B de l'électro-aimant, lorsque le
existe pas ; mais la tension de ce ressort n'est pas assez
s'opposer à ce que le morceau de fer B vienne toucher
au moment où le courant existe. Les alternatives d'exis-
l'interruption du courant donnent lieu ainsi à un mouve-
va-et-vient de la pièce de fer B, et par suite du levier
mouvement se transmet, par la tige DF, au levier
bile autour du point G. Ce dernier levier se divise en
ches dont les extrémités H, K, portent chacune une petite
disposée de manière à pouvoir s'engager entre les dents
e à rochet J, qui est fixée à l'axe de l'aiguille. Suppo-
les aiguilles des deux cadrans correspondent toutes
lettre X. D'après ce que nous avons dit, le courant élec-
a interrompu ; la pièce de fer B sera écartée de l'électro-
r l'action du ressort E, *fig.* 536 ; et la petite cheville K
a au fond de l'angle formé par deux dents de la roue J.
ène l'aiguille du premier cadran sur le trait qui sépare
X de la lettre Y, le courant s'établira ; la pièce B sera
r l'électro-aimant ; la cheville H sera poussée vers la
en glissant sur la partie oblique d'une des dents de la
le la fera tourner de manière à amener également l'ai-
second cadran sur le trait qui sépare les lettres X
537. Si l'on continue le mouvement de l'aiguille du
adran, et qu'on l'amène sur la lettre Y, le courant sera
u ; le petit ressort E entraînera le levier CD ; et la che-
en glissant à son tour sur la partie oblique d'une des
a roue J, placera la seconde aiguille sur la même lettre Y.
donc que, *si l'on fait* tourner la première aiguille en lui

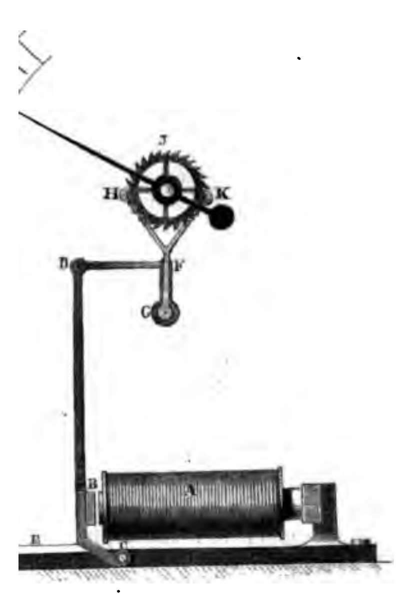


Fig. 536.

pour remplacer les lettres de l'alphabet par des signes plus expéditifs dont a signification est convenue d'avance; en sorte qu'on peut de cette manière transmettre des dépêches avec une extrême rapidité.

Nous avons dit que le courant électrique quitte le premier appareil en *f*, *fig*. 535, et pénètre dans le second en *f*; puis qu'il sort du second appareil en *k*, et qu'il rentre dans le premier en *k'* On avait établi d'abord deux fils conducteurs allant.

e dans les deux sens. Il existe pour cela à chaque sta-
ppareils comme ceux de la *fig.* 535 ; un pour envoyer
s, et un autre pour les recevoir. On met alternativement
cteur en communication avec l'un ou l'autre de ces appa-
nt que les dépêches doivent se transmettre dans un sens
utre.

Machine
motrice.
tion exer-
ı électro-
' un mor-
er deux
s son voi-
peut être
our faire
ivers mé-
et vain-
me temps
ances qui
ppliquées.
ı, il faut
u'une ma-
éciale re-
ion de l'é-
mant, de
e la ma-
apeur re-
ion de la
pour la
re ensuite
ines-outils
à la pro-

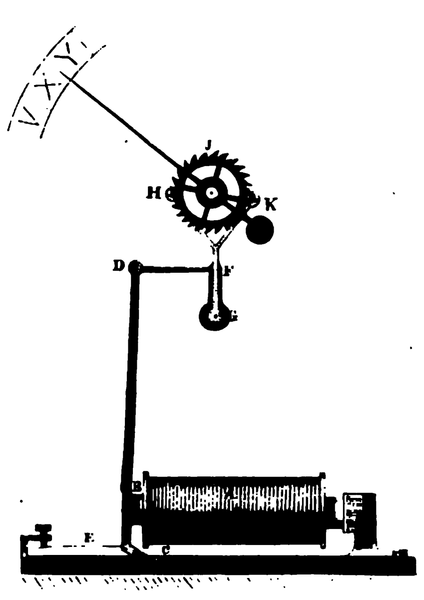


Fig. 537.

u travail utile. Cette machine spéciale, qui n'a d'autre
de servir d'intermédiaire entre l'électro-aimant et les mé-
qu'il doit faire mouvoir, se nomme une *machine électro-*

ment, un des premiers qui se soient occupés de ce genre
ies, a imaginé diverses dispositions toutes très ingénieuses.
ine que nous allons décrire, et qui est représentée par la
est celle qui a été construite pour la Faculté des sciences
par M. Bourbouze. Dans cette machine quatre cylindres
B, dont deux sont cachés par les deux autres sur la figure.

sont enveloppés par les spires nombreuses de fils métalliques recouverts de soie, qui doivent servir de passage au courant électrique. A l'intérieur de ces cylindres creux pénètrent, sans frottement, des cylindres de fer doux C, D, qui sont pleins. Les cylindres C, réunis à leur partie supérieure par une pièce transversale, également de fer doux, comme on le voit sur la *fig*. 539, sont suspendus à l'extrémité E du balancier EFG, au moyen d'une articulation. Les cylindres D sont de même suspendus au point G. Le mouvement communiqué aux pièces C, D, par l'action de l'électricité, ainsi que nous allons l'expliquer, donne lieu à des oscillations du balan-

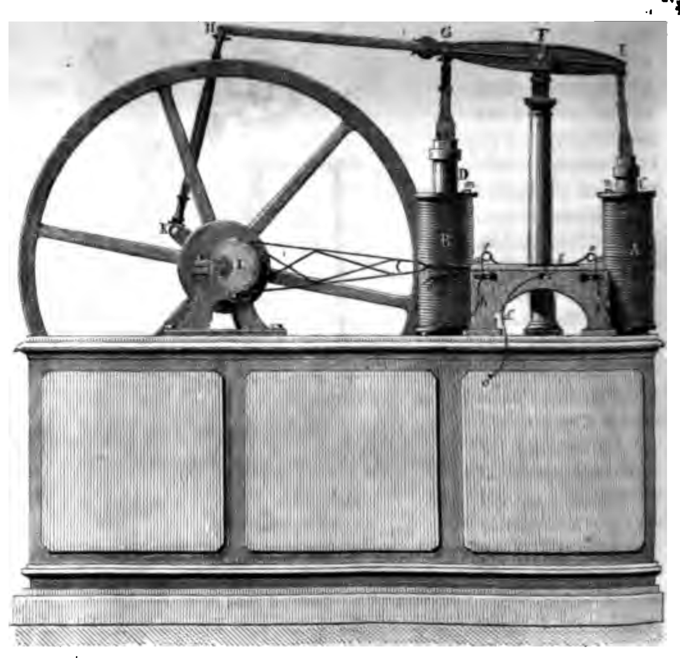


Fig. 538.

cier autour du point F. Ce balancier se prolonge jusqu'en H, et est relié en ce point à une bielle HK, qui saisit en K le bouton d'une manivelle fixée à un arbre tournant. Le mouvement oscillatoire du balancier détermine ainsi la rotation de l'arbre : un volant

: à cette rotation est destiné à en régulariser la vitesse. : comprendre comment l'électricité peut mettre en mou- pièces C, D, examinons spécialement la *fig*. 539. On y cylindres de fer C, qui pénètrent à l'intérieur des cy- ıx A, jusque près du milieu de leur hauteur. D'autres , aussi de fer, remplissent la moitié inférieure du vide s creux A, et sont réunis l'un à l'autre par une barre de se au-dessous d'eux. On a donc en réalité deux pièces C, C'C', dont chacune a la forme d'un fer à cheval, et tes deux placées de manière à pouvoir se transformer sous l'influence du courant électrique qui circule tout cylindres A. Par suite de la disposition adoptée, les deux si obtenus ont leurs pôles de noms contraires en pré- ır conséquent ils s'attirent et tendent à se mettre en aimant C'C' étant fixe, c'est l'aimant CC qui se met en , et qui abaisse ainsi l'extrémité E du balancier. Lors- vement est produit, le courant électrique cesse de passer cylindres A ; les pièces CC, C'C' repassent à l'état de cessent de s'attirer. Mais, en même temps, le courant autour des cylindres B ; la pièce de fer D se change en st attirée vers le bas de la même manière, ce qui déter- issement du point G du balancier. Le courant électrique, produit cet effet, vient de nouveau passer autour des , et ainsi de suite.

machine elle-même qui fait ırant électrique, tantôt autour s A, tantôt autour des cylin- et effet, l'arbre qui reçoit un de rotation porte un excen- *g* 538, qui donne un mouve- ı-et-vient à une glissière *aa*. ère, formée d'une petite pla- , est recouverte dans une a longueur d'une lame mé- Un fil de cuivre *c* se recourbe à venir s'appuyer constam- a pointe sur cette lame mé- algré le mouvement de va- elle reçoit de l'excentrique L; communication avec l'un des

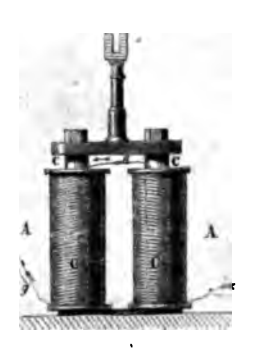


Fig. 539.

ıile par le fil conducteur *d*, qui pénètre en *o* dans le com- ıtérieur où elle est placée. Deux autres fils de cuivre *e*, *f*,

s'appuient également par leur pointe sur la glissière aa, et communiquent, l'un avec le fil g qui vient des cylindres A, l'autre avec le fil h qui vient des cylindres B. Le mouvement de va-et-vient de la glissière aa amène la plaque b alternativement sous le fil e, et sous le fil f; en sorte que le fil c est mis ainsi en communication, tantôt avec le fil g, tantôt avec le fil h, par l'intermédiaire de la plaque métallique b. En nous reportant maintenant à la *fig*. 540, qui est une coupe horizontale de la partie de la machine dont nous nous occupons, nous verrons que le courant électrique, qui vient de l'un des pôles de la pile par le fil p, et se rend à l'autre pôle par le fil d, peut suivre pour cela deux chemins différents, suivant la position qu'occupe la glissière aa. Dans la position qu'indique la figure pour cette pièce, le courant va de p en q, il tourne en montant autour d'un premier cylindre A ; il se rend par le fil n sur le second cylindre A, autour duquel il tourne en descendant ; il quitte ce second cylindre par le fil g, va de e en c par la plaque métallique b, et arrive enfin au fil d. Le passage par les cylindres B est interrompu, parce que les parties f, c, de ce passage ne sont réunies que par une portion de la plaque d'ivoire a, et que l'ivoire est un mauvais conducteur. Lorsque par suite de la rotation de l'arbre, l'excentrique amène la plaque métallique b sous le fil f, l'électricité passe par les cylindres B, et ne passe plus par les cylindres A.

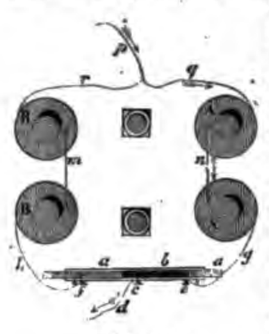


Fig. 540.

M. Froment emploie ses machines électro-motrices pour faire mouvoir des machines à diviser, et s'en sert notamment pour diviser les limbes de cercles destinés à la mesure des angles. Il arrive de cette manière à des résultats d'une précision extraordinaire : et cette grande précision est due en partie à la régularité avec laquelle fonctionnent ses machines motrices. Les machines électro-motrices n'ont pas encore reçu jusqu'à présent d'application en grand dans l'industrie. La plus forte machine de ce genre que M. Froment ait construite a la force d'un cheval.

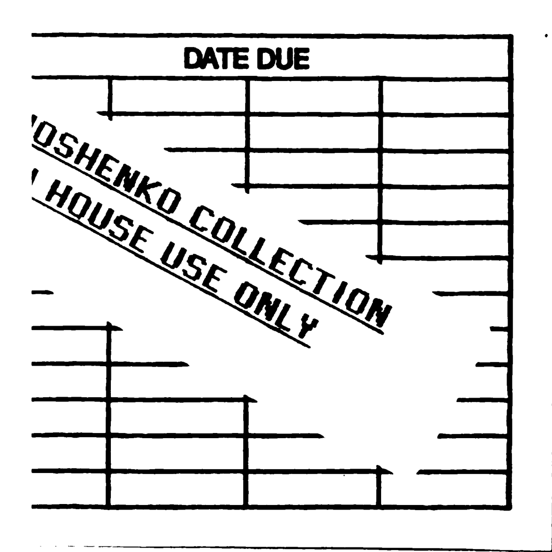
FIN.

.BLE DES MATIÈRES.

PREMIÈRE PARTIE.

DEUXIÈME PARTIE.




DATE DUE
'OSHENKO COLLECTION
' HOUSE USE ONLY




QA 807 .D42 1854 C.1
Cours elementaire de mecanique
Stanford University Libraries
3 6105 030 451 764